



**José Pedro Paiva  
de Sá Amorim**

**Soldadura laser do aço *dual-phase* 1000**



**José Pedro Paiva  
de Sá Amorim**

**Soldadura laser do aço *dual-phase* 1000**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais, por todo o esforço e sacrifício para que isto fosse possível.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**

professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

**Prof. Doutor Augusto Luís Barros Lopes**

professor auxiliar no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

orientador

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

À Universidade de Aveiro pela oportunidade que me proporcionou.

Ao meu orientador, Professor António Manuel de Bastos Pereira, pela disponibilidade e prontidão com que sempre me tratou e, claro, pelos ensinamentos e pela dedicação ao longo desta caminhada.

Ao Engenheiro António José da Fonseca Festas pelo apoio prestado na oficina.

Ao Professor João Paulo Davim pelo empréstimo do sistema de fotografia.

À Professora Gabriela Vincze pelo esclarecimento de dúvidas.

Ao DeMaC e ao Professor Augusto Lopes pela cortesia prestada.

Aos meus amigos de curso, que tornaram esta caminhada tão mais fácil.

À Dani.

À minha irmã.

Aos meus pais, por tudo.

## palavras-chave

soldadura, laser, aço *dual-phase* 1000, penetração

## resumo

A Humanidade enfrenta uma das piores crises ambientais de toda a sua história – o aquecimento global. Este fenómeno, causado essencialmente pela queima de combustíveis fósseis, tem provocado um aumento considerável na temperatura média da Terra, originando alterações significativas nos demais ecossistemas e, conseqüentemente, colocando em risco a existência da própria vida.

Tem-se vindo a desenvolver soluções menos poluentes mas estas são, muitas vezes, dispendiosas e de difícil implementação. A forma mais rápida e acessível de diminuir as emissões dos veículos tem sido o desenvolvimento de novos materiais, que tendem a ser cada vez mais leves e resistentes, para assim reduzir o peso dos automóveis e, daí, diminuir o consumo de combustível e, conseqüentemente, reduzir as emissões de dióxido de carbono.

O conhecimento insuficiente acerca da soldabilidade destes novos materiais e a ténue experiência da recente tecnologia laser aumenta o interesse do estudo destas temáticas.

Neste trabalho pretende-se mostrar a influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura do aço *dual-phase* 1000 e determinar os parâmetros laser que permitem obter uma boa soldadura deste aço.

Para isto, foi realizado um estudo experimental que envolveu as principais tarefas: maquinação de provetes, soldadura laser, corte, polimento, ataque químico, retificação, ensaios de tração, nanoindentação e, através de microscopia ótica e eletrónica, a visualização da penetração, da microestrutura e da zona termicamente afetada.

Este trabalho de investigação revelou-se notável pois determinou com rigor a influência dos demais parâmetros laser na penetração do aço *dual-phase* 1000. Mais ainda, alcançou-se o conjunto de parâmetros laser que conferem boas características à soldadura deste mesmo aço.

Os resultados obtidos foram comparados com trabalhos semelhantes de referências de renome, tendo-se encontrado divergências nalgumas conclusões obtidas. Novos trabalhos devem ser desenvolvidos para que não se comprometa o propósito desta investigação - contribuir para o aligeiramento das estruturas, mantendo ou até melhorando a resistência mecânica do produto final.

**keywords**

welding, laser, steel dual-phase 1000, penetration

**abstract**

Humanity is facing one of the worst environmental crisis in its history – the global warming. This phenomenon, caused mainly by the burning of fossil fuels has led to considerable increase in Earth's average temperature resulting in changes in the ecosystems endangering the existence of life.

It has been developed less polluting solutions but these are often costly and difficult to implement. The easiest and most affordable way to reduce vehicle emissions has been the development of new materials that tend to be less heavy and resistant so reduce the weight of the cars and hence fuel consumption and therefore reduce the emissions of dioxide carbon.

Insufficient knowledge of the weldability of these new materials and tenuous experience of recent laser technology increases the interest in the study of these issues.

This work aims to show the influence of laser parameters on penetration welding of the steel dual-phase 1000 and determine the laser parameters needed to obtain a good welding of this steel.

For this, an experimental study was carried out. This study consisted in the following main tasks: machining of samples, laser welding, cutting, polishing, chemical etching, grinding, tensile testing, nanoindentation and, through optical and electron microscopy, the examination of the penetration, microstructure and heat affected zone.

This research work has proved to be remarkable as determined rigorously the influence of the laser parameters on the penetration of steel dual-phase 1000. Moreover, it was reached the laser parameters that give good characteristics to the welding of the same steel.

The results were compared with similar works of renowned references and it was detected some different conclusions. New researches should be developed to seek the purpose of this investigation - to contribute to the improving of the mechanical strength of the final product.

# Índice

---

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Gráficos .....	xi
Simbologia.....	xii
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Motivação e objetivos.....	2
1.3. Organização do documento.....	3
2. Revisão bibliográfica .....	5
2.1. Luz.....	5
2.2. Laser.....	7
2.2.1. Breve história.....	7
2.2.2. Propriedades do laser .....	9
2.2.3. Composição do sistema laser .....	10
2.2.4. Princípio de funcionamento .....	11
2.2.5. Tipos de laser.....	13
2.2.5.1. Lasers de estado sólido .....	13
2.2.6. Áreas de aplicação.....	15
2.3. Soldadura .....	15
2.3.1. Modos de soldadura laser .....	16
2.3.2. Defeitos de soldadura .....	17
2.3.2.1. Defeitos externos de soldadura .....	19
2.3.2.2. Defeitos internos de soldadura.....	20
2.3.3. Qualidade da soldadura.....	20

2.4.	Aços de alta resistência .....	21
2.4.1.	Breve enquadramento .....	21
2.4.2.	Aços <i>dual-phase</i> (DP).....	23
2.4.2.1.	Microestrutura .....	23
2.4.2.2.	Processamento.....	24
2.4.2.3.	Aplicações.....	24
2.4.2.4.	Propriedades do aço DP1000.....	26
2.5.	Parâmetros de soldadura.....	27
2.5.1.	Parâmetros do material .....	27
2.5.2.	Parâmetros do laser .....	28
2.6.	Influência dos parâmetros de soldadura .....	31
2.6.1.	Influência da potência.....	31
2.6.2.	Influência da largura do pulso .....	33
2.6.3.	Influência da sobreposição .....	33
2.6.4.	Influência da velocidade de soldadura.....	34
2.6.5.	Influência da soldadura laser na dureza do material na zona soldada.....	36
3.	Procedimento experimental.....	39
3.1.	1ª Parte - Preparação.....	39
3.1.1.	Material .....	39
3.1.2.	Dispositivo de fixação.....	45
3.1.3.	Estação de trabalho.....	56
3.2.	2ª Parte - Estudo dos parâmetros de soldadura .....	61
3.3.	3ª Parte – Análise das amostras .....	66
3.3.1.	Macrografia.....	66
3.3.1.1.	Corte das amostras.....	66
3.3.1.2.	Polimento das amostras .....	67

3.3.1.3.	Ataque químico às amostras.....	68
3.3.1.4.	Medição da penetração.....	68
3.4.	4ª Parte – Parâmetros ótimos .....	70
3.4.1.	Parâmetros de soldadura ótimos .....	70
3.4.2.	Retificação das amostras .....	72
3.4.3.	Maquinagem das amostras.....	75
3.4.4.	Ensaio de tração.....	76
3.4.5.	Medição de microdurezas .....	79
3.4.6.	Análise da microestrutura.....	83
4.	Resultados e discussão .....	87
4.1.	Influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura.....	87
4.1.1.	Influência da potência do feixe laser .....	88
4.1.2.	Influência da duração do pulso do feixe laser.....	93
4.1.3.	Influência da sobreposição dos pontos de soldadura .....	100
4.1.4.	Influência do diâmetro do feixe laser .....	105
4.1.5.	Influência do tipo de pulso do feixe laser.....	110
4.1.6.	Influência da energia do feixe laser .....	115
4.1.7.	Influência da velocidade de soldadura.....	119
4.2.	Parâmetros ótimos.....	124
4.2.1.	Ensaio de tração.....	124
4.2.2.	Medição de microdurezas .....	137
4.2.3.	Análise da microestrutura.....	141
5.	Conclusões.....	147
6.	Trabalho futuro .....	149
	Referências bibliográficas.....	151
	Anexos.....	157

## Lista de Figuras

---

Figura 1 – Comprimento de onda [7] .....	6
Figura 2 – Espectro eletromagnético [8] .....	6
Figura 3 - Albert Einstein [12] .....	7
Figura 4 - Max Planck [13] .....	7
Figura 5 - Theodore Maiman [15] .....	8
Figura 6 - Primeiro laser de ruby [16] .....	8
Figura 7 – Ondas de luz provenientes da luz solar [6] .....	9
Figura 8 – Ondas de luz provenientes do laser[6] .....	9
Figura 9 – Composição do sistema laser [18] .....	10
Figura 10 – Representação esquemática da estrutura do átomo [21] .....	11
Figura 11 – Representação esquemática das três etapas da criação do feixe laser [22] .....	12
Figura 12 - Tipos de laser .....	13
Figura 13 - Representação esquemática do layout do laser de Nd:YAG [23] .....	14
Figura 14 – Representação esquemáticos dos diferentes tipos de soldadura [22] .....	16
Figura 15 - Representação esquemática do princípio de soldadura por condução [17] .....	16
Figura 16 - Representação esquemática do princípio de soldadura por penetração [17] .....	17
Figura 17 - Representação esquemática dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem na soldadura de um aço [27] .....	18
Figura 18 - Identificação das regiões características de uma junta soldada [28] .....	19
Figura 19 - Defeitos externos de soldadura [17] .....	19
Figura 20 - Defeitos internos de soldadura [17] .....	20
Figura 21 - Esquema que compara os diferentes tipos de aço [31] .....	22
Figura 22 – Representação esquemática da microestrutura típica de um aço DP [36] .....	23
Figura 23 – Fotografia ao microscópio da microestrutura típica de um aço DP [34] .....	23
Figura 24 – Representação esquemática da produção de aço dual-phase [34] .....	24
Figura 25 – Crescimento dos aços de alta resistência na indústria automóvel [37] .....	25
Figura 26 – Sobreposição de 50% .....	29
Figura 27 – Importância dos parâmetros laser na forma do pulso [22] .....	30
Figura 28 - Influência da sobreposição [22] .....	33

Figura 29 - Representação esquemática das amostras .....	39
Figura 30 – Dimensões das amostras de aço DP 1000 de 1 mm de espessura.....	40
Figura 31 - Guilhotina Guifil.....	40
Figura 32 – Amostras cortadas na guilhotina.....	40
Figura 33 - Amostras de aço dual-phase 1000 soldadas topo a topo .....	41
Figura 34 – Esquema de corte por guilhotina [45] .....	41
Figura 35 - Vista de uma superfície típica de uma peça cortada por guilhotina [45].....	42
Figura 36 - Fresadora CNC MIKRON VCE 500 .....	43
Figura 37 – Amostras maquinadas na CNC.....	43
Figura 38 – Superfície do topo de uma amostra após corte por guilhotina.....	43
Figura 39 - Superfície do topo de uma amostra após corte na cnc .....	43
Figura 40 – Topos não maquinados.....	44
Figura 41 – Topos maquinados.....	44
Figura 42 – Protótipo do dispositivo de fixação (versão 1) .....	45
Figura 43 – Protótipo do dispositivo de fixação (versão 1) com amostras preparadas para soldar .....	47
Figura 44 – Corte do bloco de alumínio com um serrote KASTO.....	47
Figura 45 – Dispositivo de fixação com correto alinhamento das amostras .....	48
Figura 46 - Bocal do gás na posição inicial.....	48
Figura 47 – Bocal do gás na posição final.....	48
Figura 48 - Dispositivo de fixação (versão 1) com bocal de gás.....	49
Figura 49 – Protótipo do dispositivo de fixação com adaptação para sistema de gás (versão 2) .....	50
Figura 50 - Dispositivo de fixação com adaptação para sistema de gás (versão 2) .....	51
Figura 51 – Dispositivo de fixação com bocal de gás incorporado (versão 2).....	51
Figura 52 - Simulação da trajetória do gás do primeiro adaptador .....	52
Figura 53 – Protótipo do dispositivo de fixação com adaptação para sistema de gás (versão 3) .....	53
Figura 54 – Furos responsáveis pela canalização do gás.....	54
Figura 55 – Simulação da trajetória do gás do segundo adaptador.....	54
Figura 56 – Amostra soldada com o primeiro dispositivo de fixação.....	55
Figura 57 – Amostra soldada com o segundo dispositivo de fixação.....	55
Figura 58 – Amostra soldada com o terceiro dispositivo de fixação .....	55
Figura 59 - Máquina de soldar SISMA SWA300 [46] .....	56



Figura 60 - SISMA SWA300 componentes [47] .....	57
Figura 61 - Eixos da máquina SISMA SWA300 [47].....	58
Figura 62 – Ecrã tátil [47].....	59
Figura 63 – Parâmetros laser reguláveis.....	59
Figura 64 - Espaço de trabalho: (a) Conjunto, (b) Viseira de proteção, (c) Controlo dos eixos, (d) Bocal do gás.....	60
Figura 65 – Máquina de corte Struers Labotom .....	66
Figura 66 – Interior da máquina de corte .....	66
Figura 67 – Amostra antes de ser cortada .....	67
Figura 68 – Amostra depois de ser cortada .....	67
Figura 69 - Máquina polimento Struers RotoPol-21.....	67
Figura 70 – Amostra a ser polida.....	67
Figura 71 – Preparação da solução numa hotte.....	68
Figura 72 – Solução de nital a 5% .....	68
Figura 73 - Microscópio Mitutoyo TM.....	69
Figura 74 - Câmara fotográfica Moticam .....	69
Figura 75 – Esquema de abatimento da junta soldada.....	72
Figura 76 – Esquema de amostra retificada .....	72
Figura 77 - Retificadora KENT K6S-63SD .....	73
Figura 78 – Mesa magnética.....	73
Figura 79 - Retificação da base para fixação das amostras .....	74
Figura 80 - Soldadura das extremidades das amostras à base fixadora.....	74
Figura 81 - Numeração das amostras.....	74
Figura 82 – Fixação das amostras à mesa da magnética da máquina retificadora .....	74
Figura 83 – Retificação das amostras .....	74
Figura 84 – Amostras retificadas.....	74
Figura 85 - Dimensões do provete segundo a norma ISO 6892-1:2009 .....	75
Figura 86 - Curva tensão-deformação .....	76
Figura 87 – Suporte e micrómetro Mitutoyo .....	78
Figura 88 – Medição de amostra .....	78
Figura 89 - Pontos de medição.....	78
Figura 90 – Ensaio de tração com vídeo extensómetro .....	78

Figura 91 – Shimadzu HMV-2000.....	79
Figura 92 – Indentador.....	79
Figura 93 – Representação esquemática de um teste de microdureza Vickers [55].....	80
Figura 94 – Máquina de nanoindentação CSM Instruments.....	81
Figura 95 – Amostra a ser analisada.....	81
Figura 96 – Representação esquemática da medição de microdurezas ao longo da amostra....	81
Figura 97 – Indentador Berkovick.....	81
Figura 98 – Curva típica do teste de nanoindentação [56] .....	82
Figura 99 – Curva média da aplicação da carga no material base (A) e na zona soldada (B).....	82
Figura 100 – Resultado de outra nanoindentação provocada na peça.....	82
Figura 101 – Lixamento da face da amostra.....	85
Figura 102 – Polimento da face da amostra.....	85
Figura 103 - Evolução da penetração das amostras do grupo A.....	91
Figura 104 - Evolução da penetração das amostras do grupo B .....	97
Figura 105 - Representação esquemática da duração do pulso.....	98
Figura 106 - Evolução da penetração das amostras do grupo C .....	103
Figura 107 - Evolução da penetração das amostras do grupo D .....	108
Figura 108 - Evolução da penetração das amostras do grupo E.....	113
Figura 109 - Evolução da penetração das amostras do grupo F.....	117
Figura 110 - Evolução da penetração das amostras do grupo G .....	121
Figura 111 - Tentativa de observar os grãos da amostra na resolução máxima do microscópio ótico .....	141
Figura 112 – Micrografias SEM do material base (a) e da zona termicamente afetada (b) do aço DP980 [63].....	141
Figura 113 – Polimento convencional .....	142
Figura 114 – Polimento eletrolítico na máquina Struers LectroPol-5.....	142
Figura 115 – Microscópio eletrónico (SEM).....	142
Figura 116 – Microscópio.....	142
Figura 117 - Material base .....	143
Figura 118 - Zona soldada (microestrutura acicular) [65].....	143
Figura 119 - Zona de transição.....	144
Figura 120 – Modificação no dispositivo de fixação.....	150

Figura 121 – Modificação no dispositivo de fixação.....	150
Figura 122 – Orientação dos tubos que conduzem o gás .....	150
Figura 123 – Simulação da trajetória do gás .....	150

## Lista de Tabelas

---

Tabela 1 - Aplicações dos aços dual-phase na indústria automível.....	25
Tabela 2 - Propriedades mecânicas [38].....	26
Tabela 3 - Composição química [38].....	26
Tabela 4 - Influência da potência na penetração da soldadura .....	32
Tabela 5 - Influência da largura do pulso na penetração da soldadura.....	33
Tabela 6 - Influência da velocidade na penetração da soldadura.....	35
Tabela 7 – Influência da soldadura laser na dureza do material.....	37
Tabela 8 - Funcionamento do dispositivo de fixação .....	46
Tabela 9 - Caraterísticas da máquina de soldadura laser SISMA SWA300 .....	56
Tabela 10 - Tipo de pulso disponíveis [47] .....	60
Tabela 11 – Influência da potência do feixe laser .....	62
Tabela 12 – Influência da duração do pulso do feixe laser .....	62
Tabela 13 – Influência da sobreposição dos pontos de soldadura .....	63
Tabela 14 – Influência do diâmetro do feixe laser .....	63
Tabela 15 – Influência do tipo de pulso do feixe laser .....	64
Tabela 16 – Influência da energia do feixe laser.....	65
Tabela 17 – Influência da velocidade de soldadura.....	65
Tabela 18 - Sequência de granulometria utilizada .....	67
Tabela 19 - Parâmetros ótimos de soldadura .....	71
Tabela 20 - Amostras maquinadas.....	75
Tabela 21 - Preparação de amostras para polir .....	84
Tabela 22 - Sequência de polimento .....	85
Tabela 23 - Resultados das amostras do grupo A .....	88
Tabela 24 – Valores da penetração obtidos das amostras do grupo A .....	91
Tabela 25 - Resultados das amostras do grupo B.....	93
Tabela 26 – Valores da penetração obtidos das amostras do grupo B .....	97
Tabela 27 - Resultados das amostras do grupo C .....	100
Tabela 28 – Valores da penetração obtidos das amostras do grupo C .....	103
Tabela 29 - Resultados das amostras do grupo D .....	105

Tabela 30 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo D.....	108
Tabela 31 - Resultados das amostras do grupo E .....	110
Tabela 32 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo E .....	113
Tabela 33 - Resultados das amostras do grupo F.....	115
Tabela 34 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo F .....	117
Tabela 35 - Resultados das amostras do grupo G.....	119
Tabela 36 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo G.....	121
Tabela 37 - Medição da secção do provete.....	124
Tabela 38 – Resultados do ensaio de tração da amostra X0.....	125
Tabela 39 - Resultados do ensaio de tração da amostra X1 .....	126
Tabela 40 - Resultados do ensaio de tração da amostra X2 .....	127
Tabela 41 - Resultados do ensaio de tração da amostra X3 .....	128
Tabela 42 - Resultados do ensaio de tração da amostra X4 .....	129
Tabela 43 - Resultados do ensaio de tração da amostra X5 .....	130
Tabela 44 - Resultados do ensaio de tração da amostra X6 .....	131
Tabela 45 - Resultados do ensaio de tração da amostra X7 .....	132
Tabela 46 - Resultados do ensaio de tração da amostra X8 .....	133
Tabela 47 - Resultados do ensaio de tração da amostra X9 .....	134
Tabela 48 - Resultados do ensaio de tração da amostra X10 .....	135
Tabela 49 - Resultados da medição de microdurezas por nanoindentação.....	137
Tabela 50 - Média dos resultados da medição de microdurezas.....	138
Tabela 51 - Resultados da medição das microdurezas em Vickers .....	139
Tabela 52 - Relação entre a dureza medida em GPa na nanoindentação e em Vickers.....	140
Tabela 53 - Comparação dos resultados de microdurezas dos dois métodos .....	140
Tabela 54 - Imagens da soldadura realizada pelos parâmetros ótimos .....	145
Tabela 55 - Parâmetros ótimos para a soldadura do aço DP1000 de 1 mm de espessura.....	145

## Lista de Gráficos

---

Gráfico 1 - Ciclo de temperatura.....	123
Gráfico 2 - Resumo da tensão real obtida em todas as amostras .....	136
Gráfico 3 - Resumo da deformação real obtida em todas as amostras.....	136
Gráfico 4 - Dureza de amostra.....	137

## Simbologia

---

$A_0$	Área da secção inicial	[mm <sup>2</sup> ]
$c$	Calor específico	[J/(kg.K)]
$d$	Diâmetro	[mm]
$D$	Diâmetro	[mm]
$F$	Força	[N]
$F_{\text{máx}}$	Força máxima	[N]
$f$	Frequência	[Hz]
$E$	Módulo de <i>Young</i>	[GPa]
$E_m$	Energia média do pulso	[J]
$E_p$	Energia do pulso	[J]
$h$	Penetração	[mm]
$L_0$	Comprimento inicial	[mm]
$L_m$	Calor latente de fusão	[J/kg]
$K$	Constante	-
$P_p$	Potência de pico do pulso	[W]
$Q$	Calor	[J]
$T_0$	Temperatura inicial	[°C]
$T_m$	Temperatura de fusão	[°C]
$t$	Tempo	[s]
$v$	Velocidade	[mm/s]
$\rho$	Densidade de volume	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão nominal	[MPa]
$\sigma_{\text{real}}$	Tensão real	[MPa]
$\epsilon$	Deformação nominal	-
$\epsilon_{\text{real}}$	Deformação real	-
$\Delta L$	Variação do comprimento	[mm]

# 1.

## Introdução

*‘I really do believe that if you don’t challenge yourself and risk failing, that’s not interesting.’*

Julie Taymor

---

**Neste capítulo apresenta-se o enquadramento desta investigação, a motivação e objetivos que levaram à escolha deste tema e também a organização do documento.**

### 1.1. Enquadramento

Em pleno século XXI, a Humanidade enfrenta uma das piores crises ambientais de toda a sua história - o aquecimento global. Este fenómeno resulta especialmente da queima de combustíveis fósseis. Estima-se que cerca de 19% das emissões de CO<sub>2</sub> na União Europeia são produzidas por carros de passageiros e veículos comerciais [1]. As emissões de gases de efeito de estufa obstruem a dissipação do calor do planeta para o espaço. Este processo desencadeia um aumento da temperatura média dos oceanos e do ar da superfície terrestre. O aumento da temperatura média da Terra desencadeia alterações significativas nos demais ecossistemas, colocando em risco a existência de vida na Terra.

Tem-se vindo a desenvolver soluções menos poluentes para que as indústrias consigam cumprir com as legislações cada vez mais apertadas e rigorosas. Contudo, estas soluções são muitas vezes de difícil implementação, dispendiosas e de desenvolvimento demorado. Assim, uma forma mais rápida e acessível de diminuir as emissões dos veículos tem sido o desenvolvimento de novos materiais, que tendem a ser cada vez mais leves e resistentes. Desta forma, os veículos são mais leves o que leva a um consumo menor de combustível e, consequentemente, a uma redução das emissões de dióxido de carbono [2].



Os materiais que têm sido alvo de especial atenção são os aços de elevada resistência, da qual se destacam os aços *dual-phase*, pois possuem uma boa combinação entre resistência mecânica e ductilidade [3].

O pouco conhecimento acerca da soldabilidade destes aços, tal como a escassez de parâmetros de soldadura padronizados face às vastas potenciais aplicações deste material, levam ao crescimento do interesse do estudo dos aços *dual-phase* [2].

A soldadura laser é uma das mais recentes tecnologias de soldadura disponíveis na indústria. Com esta tecnologia é possível atingir resultados difíceis ou mesmo impossíveis de obter por outros métodos de soldadura. Apesar de já haver centenas de livros e artigos dedicados ao estudo do processamento por feixe laser, ainda existe pouco conhecimento na aplicação do laser na soldadura.

Muito recentemente, a indústria automóvel tem vindo a utilizar soldadura laser para a fixação dos painéis nas estruturas dos automóveis como alternativa à soldadura por pontos. Isto deve-se ao facto de o laser ser capaz de produzir soldaduras de menores dimensões, com maiores penetrações de soldadura e também por só necessitar de ter acesso a um dos lados da peça a soldar. A utilização de soldadura laser proporciona ainda um aumento da resistência estrutural e tem a capacidade de ser usada para soldadura a altas velocidades [4].

O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro adquiriu muito recentemente uma máquina de soldadura laser – SISMA SWA300 – pelo que, dado o conhecimento embrionário na soldadura laser de aços *dual-phase*, revelou-se interessante desenvolver uma investigação de forma a contrair mais conhecimento neste setor.

A presente investigação consiste no estudo experimental da influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura dos aços *dual-phase*. Espera-se, com este trabalho, determinar qual a influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura do aço *dual-phase* 1000 e descobrir quais os parâmetros de soldadura mais propícios para soldar este aço.

## **1.2. Motivação e objetivos**

A soldadura, tal como referido na secção anterior, é um processo tecnológico deveras importante e com repercussões elevadíssimas no nosso quotidiano. Assim-sendo, ter a oportunidade de contribuir para o aumento do conhecimento neste campo torna-se um desafio muito aliciante.

Os objetivos que se pretendem alcançar com esta investigação podem ser enumerados da seguinte forma:

- Estudar a influência da potência de pico do pulso laser na penetração e acabamento da soldadura;
- Estudar a influência da duração do pulso laser na penetração e acabamento da soldadura;
- Estudar a influência da sobreposição dos pulsos na penetração e acabamento da soldadura;
- Estudar a influência do diâmetro do feixe laser na penetração e acabamento da soldadura;
- Estudar a influência dos vários tipos de pulso do feixe laser na penetração e acabamento da soldadura;
- Estudar a influência da velocidade do feixe laser na penetração e acabamento da soldadura;
- Determinar quais os parâmetros de soldadura que conferem as melhores propriedades mecânicas.

Com este trabalho de investigação, e através dos objetivos traçados anteriormente, espera-se contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de soldadura laser bem como alargar o conhecimento na soldadura de aços *dual-phase*.

### **1.3. Organização do documento**

Este documento está organizado em seis capítulos e vários subcapítulos com vista a facilitar a leitura e a compreensão do mesmo. Os capítulos podem ser resumidos da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução  
Neste capítulo apresenta-se o enquadramento desta investigação, a motivação e objetivos que levaram à escolha deste tema e também a organização do documento;
- Capítulo 2 - Revisão bibliográfica  
Este capítulo visa elaborar uma revisão bibliográfica sobre os princípios de funcionamento inerentes à tecnologia laser, as características que distinguem esta tecnologia das demais e as principais aplicações na indústria onde o uso desta tecnologia é vantajosa bem como as características e principais aplicações do material a soldar;

- Capítulo 3 - Procedimento experimental

Neste capítulo pretende-se fazer a descrição de todo o procedimento experimental bem como a metodologia adotada para cumprir com todos os objetivos inicialmente propostos;

- Capítulo 4 – Resultados e discussão

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos nos testes realizados;

- Capítulo 5 – Conclusão

As conclusões são apresentadas e discutidas neste capítulo;

- Capítulo 6 – Trabalho futuro

Neste capítulo são apresentadas sugestões que visam melhorar e desenvolver o trabalho realizado.

No início de cada capítulo far-se-á igualmente uma breve descrição do que será abordado no mesmo, para uma melhor clareza para o leitor.

# 2.

## Revisão bibliográfica

*‘The only place success comes before work is in the dictionary.’*

Vince Lombardi

---

**Este capítulo visa fazer uma revisão bibliográfica sobre os princípios de funcionamento inerentes à tecnologia laser, as características que distinguem esta tecnologia das demais e as principais aplicações na indústria onde o uso desta tecnologia é vantajosa bem como as características e principais aplicações do material a soldar;**

### 2.1. Luz

A luz natural, proveniente do sol, é a fonte principal de energia através da qual o nosso planeta sobrevive. Os raios de luz emitidos pelo sol viajam a uma velocidade de cerca de 300 000 km/s e demoram por volta de 8 minutos a chegar à superfície terrestre [5]. Os raios de sol são depois absorvidos pelas moléculas dos materiais/substâncias existentes na superfície terrestre, provocando a excitação dessas mesmas moléculas, levando-as a vibrar e a gerar calor [6].

Segundo o cientista Isaac Newton, a luz solar pode ser decomposta num conjunto de cores denominado espectro contínuo. Na realidade, cada uma das cores deste espectro corresponde a ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda diferentes. O comprimento de onda é a distância entre dois picos consecutivos de uma onda, como representa a Figura 1[5].

Apesar de o espectro eletromagnético ser contínuo, são atribuídas designações diferentes a diferentes intervalos de comprimento de onda, sendo que a luz visível está apenas compreendida entre os comprimentos de onda de  $0.4 \times 10^{-6}$  m e  $0.7 \times 10^{-6}$  m (ver Figura 2).

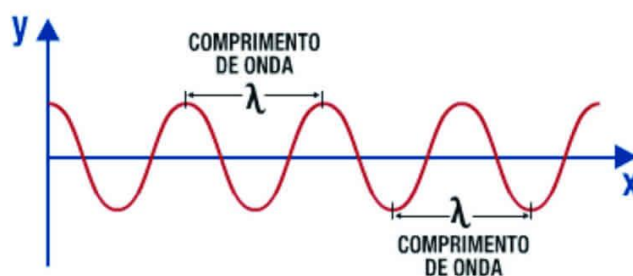


Figura 1 – Comprimento de onda [7]

Todas as radiações transportam energia, sendo que as radiações ultravioleta são mais energéticas que as visíveis, assim como as radiações infravermelhas são menos energéticas que as visíveis. Pode-se dizer, assim, que quanto maior o comprimento da onda, menor será a energia da radiação e vice-versa. Ainda que o espectro possa ser classificado em intervalos, quando qualquer energia radiante é absorvida por um objeto, o resultado é sempre um crescimento do movimento molecular resultando num aumento da temperatura.

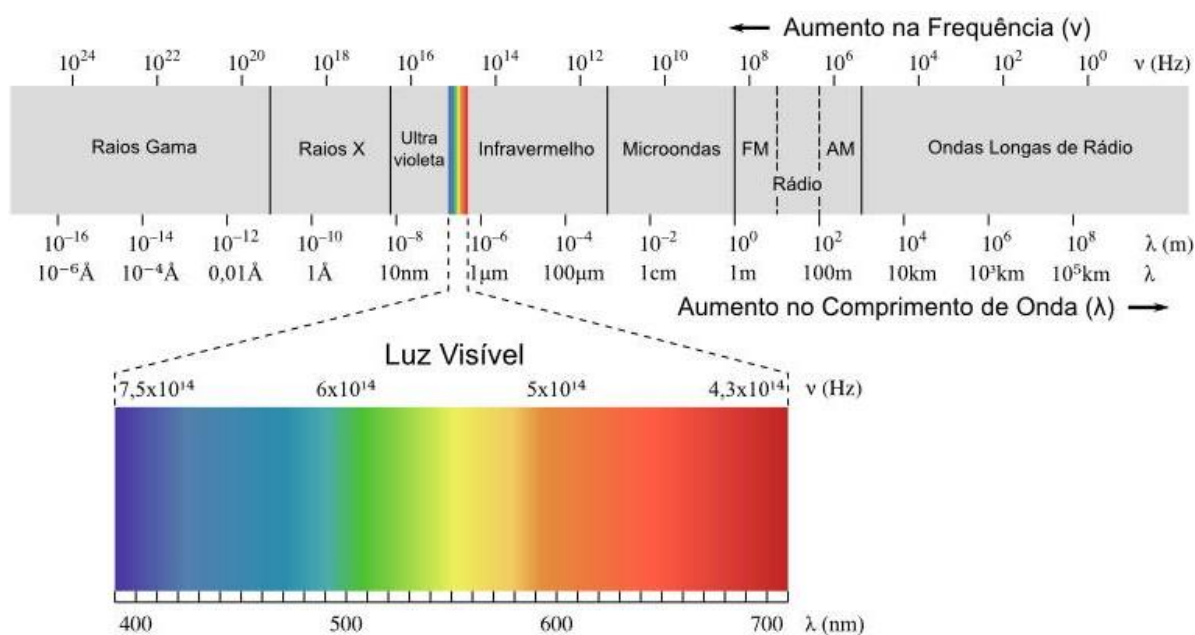


Figura 2 – Espectro eletromagnético [8]

A capacidade dos diferentes comprimentos de onda de luz se poderem transformar em energia sob a forma de calor, quando absorvidos por diferentes substâncias, juntamente com o facto de que a luz pode ser transmitida por longas distâncias e depois ser concentrada num ponto, levando a um aumento da densidade de potência ( $W/mm^2$ ), levou os cientistas e engenheiros a desenvolver os denominados lasers [6].

## 2.2. Laser

### 2.2.1. Breve história

Isaac Newton descreveu, em 1704, que a luz pode ser considerada uma corrente de partículas. Mais tarde, em 1803, Young, com a descoberta da polaridade da luz, identificou o comportamento ondulatório desta. Em 1905, Albert Einstein (Figura 3) propôs o conceito de quanta, no qual defende que a luz é composta por partículas individuais e que estas possuem uma quantidade discreta de energia. Hoje estas partículas são denominadas fótons [9][10][11]. Maxwell defendeu ainda a luz como sendo uma vibração rápida de um campo eletromagnético resultante de oscilações de partículas. Outrora, aquando da descoberta do fenómeno da radiação do corpo negro, no início do século XX, a teoria de Maxwell foi descartada. Esta teoria, publicada por Max Planck (Figura 4) em 1900, defendia que a luz era uma forma de radiação eletromagnética. Sem este princípio, o laser nunca teria sido inventado.

A grande contribuição de Einstein para a tecnologia laser deu-se em 1917 quando descobriu que, caso fosse possível uma inversão de população entre níveis de energia superior e inferior, seria possível obter uma radiação estimulada amplificada [9][11].

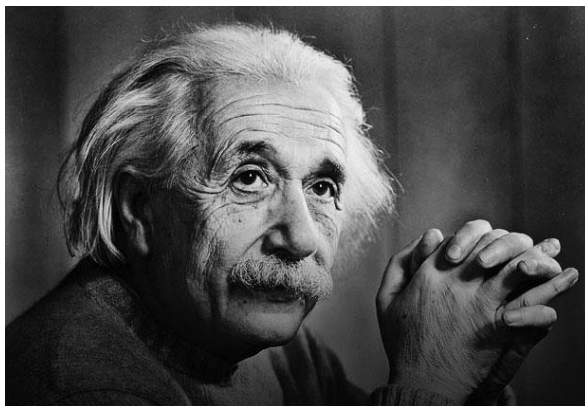


Figura 3 - Albert Einstein [12]

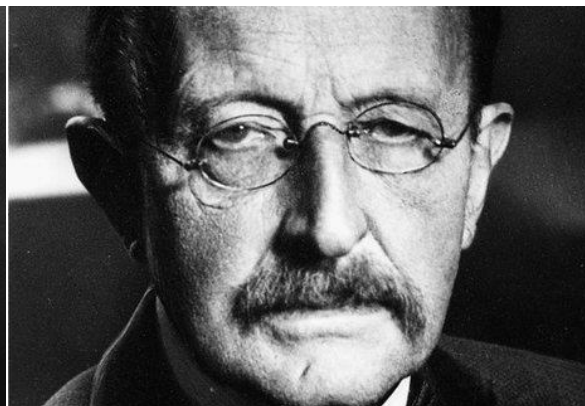


Figura 4 - Max Planck [13]

No entanto, os engenheiros não utilizaram este princípio para fins mais práticos antes da década de 1940. Só no início da década de 1950 é que começaram a ser desenvolvidos mecanismos para aproveitamento da energia através do princípio defendido por Einstein, na qual os cientistas Charles Townes, Joseph Weber, Alexander Prokhorov e Nikolai G Basov se destacaram [11] [14].

Nesta fase, os engenheiros trabalhavam na criação naquilo que se denominava MASER (*Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*), um dispositivo capaz de

amplificar micro-ondas para aplicação em sistemas de comunicação micro-ondas. Charles Townes, da Universidade da Columbia, e outros engenheiros acreditavam ser possível criar um maser ótico, um dispositivo capaz de criar poderosos feixes de luz usando energia de alta frequência. Apesar do trabalho pioneiro de Townes e Prokhorov, foi Theodore Maiman (Figura 5) que em 1960 inventou o primeiro laser com o nome “LOSER” (*Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*) que funcionava de forma pulsada e emitia uma luz de cor vermelha (Figura 6). No entanto, Townes e Prokhorov foram mais tarde compensados pelo seu trabalho com o Prémio Nobel da Ciência em 1964 [9][11][14].

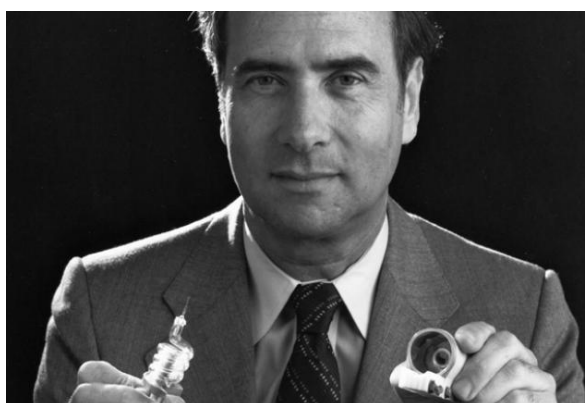


Figura 5 - Theodore Maiman [15]

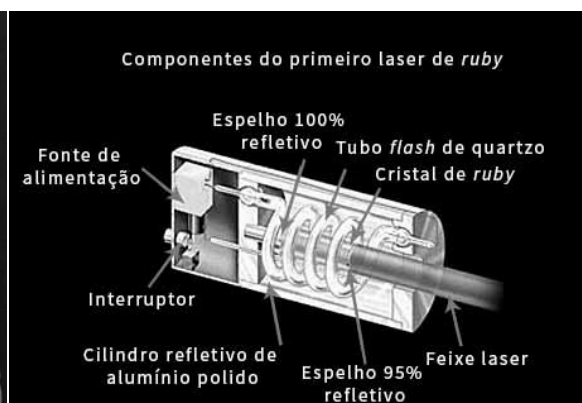


Figura 6 - Primeiro laser de ruby [16]

O laser foi um notável avanço tecnológico, embora nos seus primeiros anos tenha sido uma tecnologia que não servia qualquer propósito. Não era potente o suficiente para ser usado em armas para a indústria bélica e a sua utilidade para a transmissão de informações através da atmosfera era severamente prejudicada devido à sua incapacidade de penetrar as nuvens e a chuva [11].

No entanto, pouco tempo depois, alguns engenheiros começaram a encontrar utilidade para o laser. Mainman e outros engenheiros desenvolveram armas com sistemas de mira laser e lasers para uso em cirurgias [11].

Desde então tem existido uma evolução contínua até aos dias de hoje. Por exemplo, os lasers são usados para cirurgias oculares de extrema precisão e para as mais diversas aplicações da indústria onde a precisão é requerida [9][11].



### 2.2.2. Propriedades do laser

A palavra laser é um acrónimo de (L) *light* (A) *amplification* (S) *stimulated by the* (E) *emission of* (R) *radiation*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada da radiação.

O que diferencia os lasers de outro tipo de fontes de luz, como por exemplo o sol, é a forma como a luz é criada. E a forma como a luz é criada no laser é o que lhe confere as suas propriedades com inúmeras áreas de aplicação.

Ao contrário da luz do sol, que é irradiada em todas as direções e com todos os comprimentos de onda e desfasados entre si (ver Figura 7), o feixe laser é (ver Figura 8) [17]:

- Monocromático: Todas as ondas de luz têm o mesmo comprimento de onda;
- Coerente: Todas as ondas de luz estão em fase, produzindo um feixe de laser contínuo;
- Direcional: Todas as ondas de luz são aproximadamente paralelas.

Esta última propriedade tem especial importância para o processamento de materiais. Como as ondas de luz têm todas a mesma direção, é possível criar um feixe de luz compacto que contenha muita potência. Este feixe pode ser conduzido por longas distâncias e pode ser aplicado no material com um foco de diâmetro muito pequeno aumentando drasticamente a densidade de potência aplicada naquele local. A densidade de potência ( $\text{W}/\text{mm}^2$ ) é  $10^7$  vezes mais elevada no feixe laser do que numa lâmpada incandescente [17].

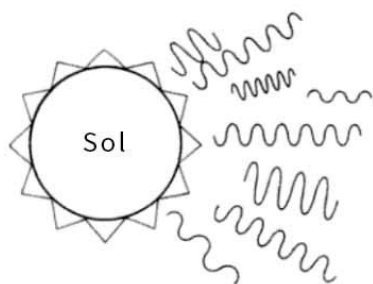


Figura 7 – Ondas de luz provenientes da luz solar [6]

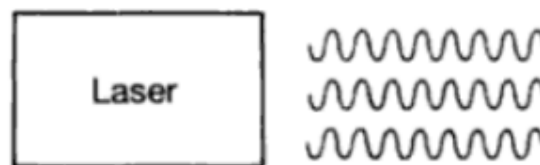


Figura 8 – Ondas de luz provenientes do laser [6]

Quando a radiação laser é confinada a um ponto, a densidade de potência consegue ser muito mais eficiente nesta radiação do que na radiação solar devido ao paralelismo entre as radiações do feixe laser.



### 2.2.3. Composição do sistema laser

Apesar de existirem variados tipos de laser, todos obedecem aos mesmos princípios físicos para gerar o feixe laser. A Figura 9 mostra o esquema dos principais constituintes responsáveis por originar o feixe laser.

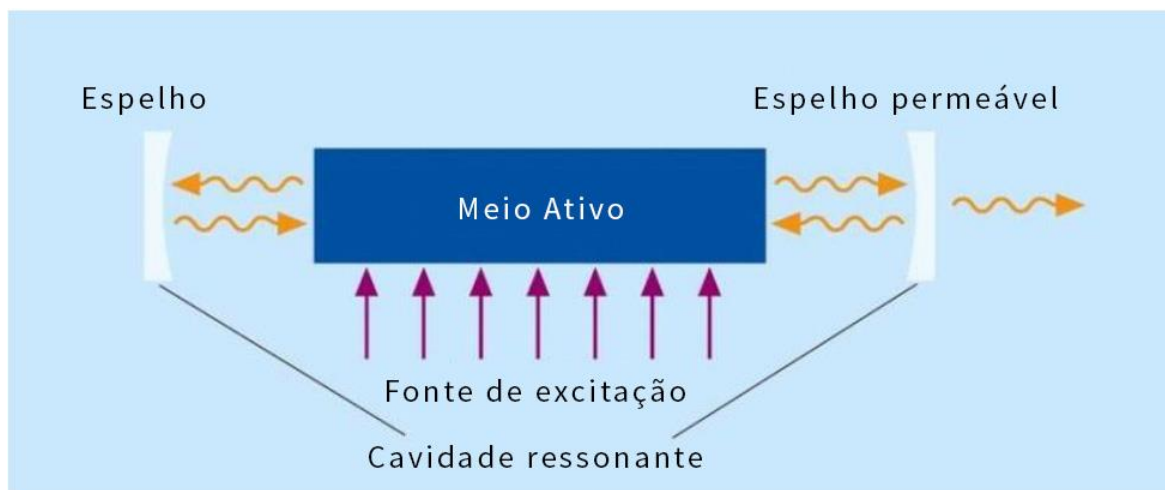


Figura 9 – Composição do sistema laser [18]

A cavidade ressonante consiste em dois espelhos com índices de refletividade diferentes colocados paralelos entre si de forma a formarem um oscilador ótico que funciona como cavidade através da qual a luz se vai deslocar [19].

Entre os espelhos está o meio ativo que é a substância através da qual os fotões oscilam e o laser é amplificado. Esta substância pode ser um gás, líquido ou sólido uma vez que, quando excitados, estas substâncias emitem radiação em forma de ondas de luz (fotões) [6] [17] [19].

Para que o meio ativo possa emitir luz, é necessário fornecer energia a esse meio de forma a excitá-lo. A forma como a energia é fornecida depende do meio ativo utilizado. No entanto, a energia é normalmente fornecida por processos óticos, elétricos ou químicos [17] [19].

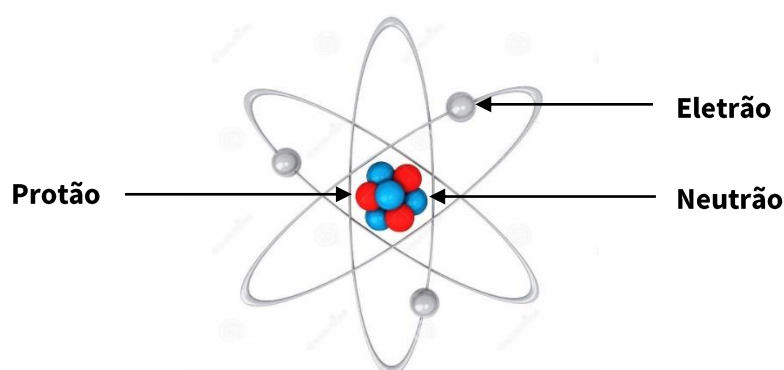
Um dos espelhos é totalmente impermeável e reflete todos os fotões. O outro é parcialmente transparente e permite que parte dos fotões o atravessem formando o feixe laser [17].

Uma grande parte da energia não é convertida em luz laser mas sim em calor. O sistema de arrefecimento existente na fonte laser dissipa, assim, o calor para assegurar que o meio ativo e a cavidade ressonante não sobreaqueçam, garantindo o correto funcionamento do laser [17].

#### 2.2.4. Princípio de funcionamento

A tecnologia laser tem evoluído consideravelmente, existindo hoje vários tipos de laser e com diversas aplicações e finalidades. Porém, o princípio de funcionamento é em tudo semelhante para os vários tipos de laser existentes.

Para entender o princípio de funcionamento de um laser é deveras importante rever um pouco de física atômica. Um átomo consiste num núcleo central de carga elétrica positiva envolto por uma nuvem de eletrões de carga negativa. O núcleo atômico é composto por protões e neutrões. A Figura 10 mostra uma representação esquemática da estrutura do átomo [20].



*Figura 10 – Representação esquemática da estrutura do átomo [21]*

Quando se fornece energia a um átomo, os eletrões procuram novas posições para ficarem em equilíbrio. Isto pode corresponder à passagem para uma órbita superior com maior energia. Após a chegada a esse ponto, o eletrão tenta voltar para o seu estado fundamental. É nesta altura que são libertados fotões, que não são nada mais que a energia absorvida pelo eletrão descarregada sobre a forma de fotões [9].

A criação de um feixe laser consiste essencialmente em três etapas que ocorrem quase instantaneamente. Estas etapas são:

- I. A fonte fornece energia para o meio ativo, excitando os átomos de tal forma que os eletrões são elevados temporariamente para estados de energia mais altos. Como os eletrões não podem permanecer lá indefinidamente, são forçados a descer para um nível de energia mais baixo. Neste processo, o eletrão perde o excesso de energia obtida com a energia da fonte através da emissão de um fotão. Isto é chamado de emissão

- espontânea e os fótons produzidos por este método são a semente para a geração do feixe laser [22];
- II. Os fótons emitidos pela emissão espontânea podem, eventualmente, colidir com eletrões que estejam em estados de energia mais altos. O fóton ao colidir com o eletrão leva-o a descer para um nível de energia mais baixo dando a origem a um novo fóton. Estes dois fótons são coerentes o que significa que estão em fase, com o mesmo comprimento de onda e deslocam-se com a mesma direção. Este fenómeno é designado de emissão estimulada [22];
  - III. Os fótons são emitidos em todas as direções levando a que se desloquem através do meio ativo até colidirem com os espelhos da cavidade ressonante e serem refletidos novamente para o meio ativo. Os espelhos da cavidade ressonante definem a direção de amplificação preferencial da emissão estimulada. Para que a amplificação ocorra, deve haver uma maior percentagem de átomos no estado excitado do que átomos em níveis de energia mais baixos. Esta "inversão de população" de mais átomos no estado excitado leva às condições exigidas para a geração da luz laser [22].

A Figura 11 ilustra uma representação esquemática das três etapas da criação do feixe laser.

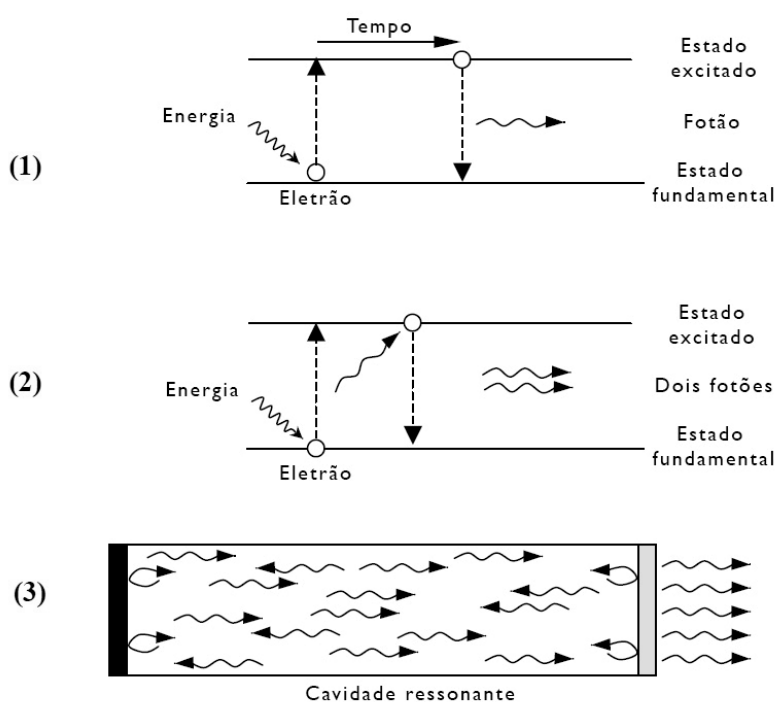


Figura 11 – Representação esquemática das três etapas da criação do feixe laser [22]

### 2.2.5. Tipos de laser

Hoje em dia, depois da evolução constante que a tecnologia laser tem vindo a sofrer, é possível encontrar diversos tipos de laser que servem os propósitos das mais diferentes áreas de aplicação. A designação dos mesmos é feita com base no material que constitui o meio ativo do equipamento, existindo assim três categorias: lasers de estado sólido, líquido e gasoso [9]. Os lasers de estado sólido podem ainda ser subdivididos em categorias de acordo com a geometria do meio ativo. Estes podem ser varões (*rod lasers*), discos (*disc lasers*) e fibras (*fiber lasers*) [23].

A Figura 12 representa um diagrama da classificação dos diversos tipos de laser.

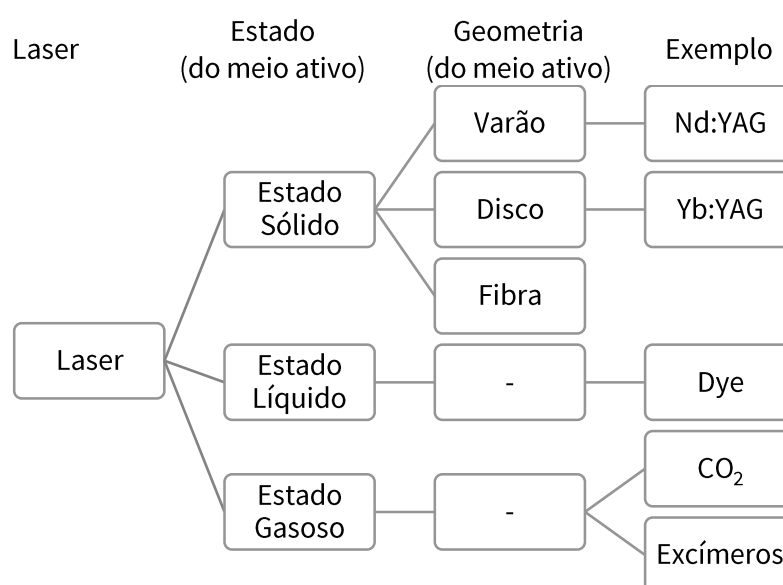


Figura 12 - Tipos de laser

#### 2.2.5.1. Lasers de estado sólido

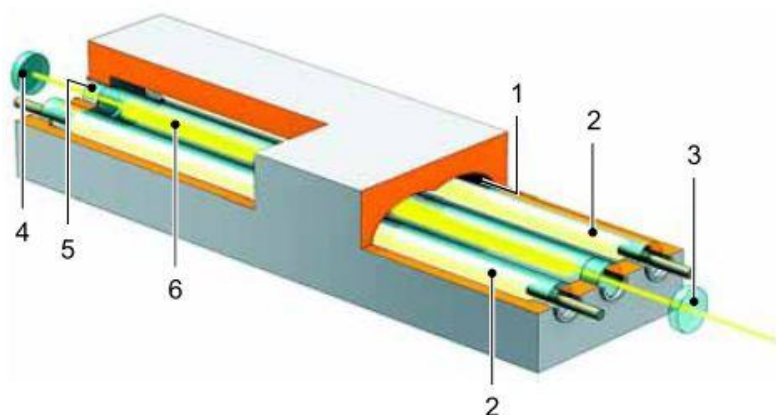
É aqui dado mais realce a este tipo de lasers uma vez que o laser utilizado neste trabalho é um Nd:YAG. Os lasers de estado sólido são usados na produção industrial desde o início da década de 1970. Os primeiros lasers eram caracterizados por terem curtos pulsos de laser com uma potência de 1 kW ou mais, o que lhes conferia boas características para soldadura por pontos e para furação [23].

Hoje existem muitos lasers de estado sólido diferentes. Estes lasers diferem na forma e no material do meio ativo, no *design* da cavidade ressonante e no tipo de fonte de excitação. Esta diversidade é o que confere aos lasers tanta versatilidade. Estes lasers são vulgarmente utilizados em soldadura, corte e furação [23].

Os lasers de Nd:YAG disponíveis no mercado possuem potências entre os 100 W e os 1000 W. Apesar desta vasta gama de potências, estes lasers possuem uma potência ainda inferior aos lasers de CO<sub>2</sub>, uma vez que estes conseguem atingir potências de pico na ordem dos 10 kW. Em termos de performance, um laser Nd:YAG de 150 W é capaz de soldar uma chapa de 0,5 mm de espessura a uma velocidade de 0,3 m/min enquanto que um laser de 1 kW consegue soldar facilmente uma chapa de 4 mm de espessura à mesma velocidade [6].

O aspeto mais importante deste tipo de lasers é o comprimento de onda do feixe (1,06 µm) que pode ser transmitido através de um cabo de fibra ótica e que torna este laser muito atrativo para produção de soldaduras a altas velocidades e automação [6].

A representação esquemática dos lasers Nd:YAG está ilustrada na Figura 13.



- |                           |                      |                                 |
|---------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1 – Cavidade ressonante   | 3 – Espelho de saída | 5 – Tubo de refrigeração        |
| 2 – Lâmpadas <i>flash</i> | 4 – Espelho final    | 6 – Cristal cilíndrico (Nd:YAG) |

Figura 13 - Representação esquemática do layout do laser de Nd:YAG [23]

O tipo de laser Nd:YAG utiliza um meio ativo sólido cristalino constituído por um cilindro de YAG (*Yttrium Aluminium Garnet* ( $Y_3Al_5O_{12}$ )). O cilindro de YAG encontra-se localizado na cavidade ressonante sendo excitado por lâmpadas de *flash* (krípton ou xénon). O número de lâmpadas a utilizar depende essencialmente da potência máxima que se pretende emitir. Estas lâmpadas podem ainda ser dispostas de várias formas.

A radiação laser é produzida através da emissão estimulada. Esta tem que ser amplificada numa cavidade ressonante para posteriormente ser emitida. A luz laser é então produzida no cilindro de Nd:YAG. As dimensões deste são importantes na medida em que quanto maior for o cilindro maior será a potência máxima que o laser dispõe.

### 2.2.6. Áreas de aplicação

As máquinas laser tem vindo a revolucionar a indústria devido às suas atrativas vantagens. Estas máquinas têm as seguintes características [23]:

- Sem contato: os lasers não tocam mecanicamente na peça de trabalho;
- Alta precisão: os lasers conseguem reproduzir contornos de elevada precisão;
- Aquecimento local: a zona termicamente afetada é muito reduzida;
- Flexibilidade: uma enorme variedade de formas e contornos podem ser feitos com uma única ferramenta;
- Acessibilidade: Acesso por um só lado da junta, facto que é uma enorme vantagem quando comparado com a soldadura por resistência.

Apesar das vantagens da tecnologia laser, convém pesar as mais-valias da mesma com o investimento necessário quando comparado com outras tecnologias alternativas. Porém, convém ressaltar o seguinte [23]:

- Os lasers são rápidos. A velocidade de processamento da tecnologia laser é por norma superior às tecnologias alternativas;
- Os lasers garantem qualidade. A perfeição do trabalho laser é por regra melhor do que o das tecnologias convencionais;
- Os lasers reduzem os trabalhos de acabamento. Os lasers permitem, desde logo, um bom acabamento sendo desnecessárias etapas posteriores de melhoramento.

Todas estas características fazem com que a velocidade de produção aumente, crescendo a produtividade e compensando o investimento em tecnologias laser. São estas características que fazem com que o laser seja competitivo face às tecnologias convencionais.

## 2.3. Soldadura

A soldadura é um processo de ligação permanente entre duas peças de materiais iguais ou diferentes, mas de compatibilidade metalúrgica, através de uma união atómica entre as superfícies em contacto, obtendo-se uma junta com propriedades mecânicas análogas ou superiores às do metal base [24].

### 2.3.1. Modos de soldadura laser

Quando o feixe laser é irradiado na superfície da peça, a energia absorvida pelo material origina a fusão do mesmo [25].

A flexibilidade do laser oferece três tipos de soldadura: por condução, condução/penetração e penetração ou *keyhole*. A Figura 14 representa os três diferentes tipos de soldadura.

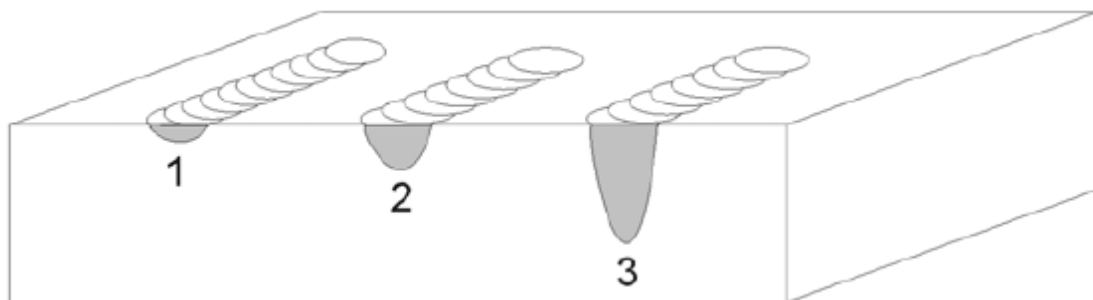
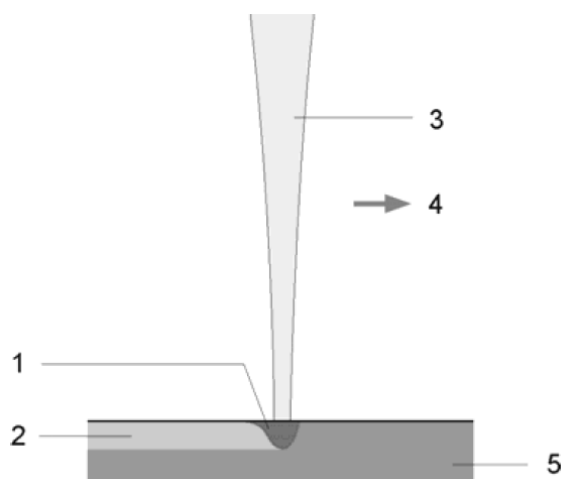


Figura 14 – Representação esquemática dos diferentes tipos de soldadura [22]

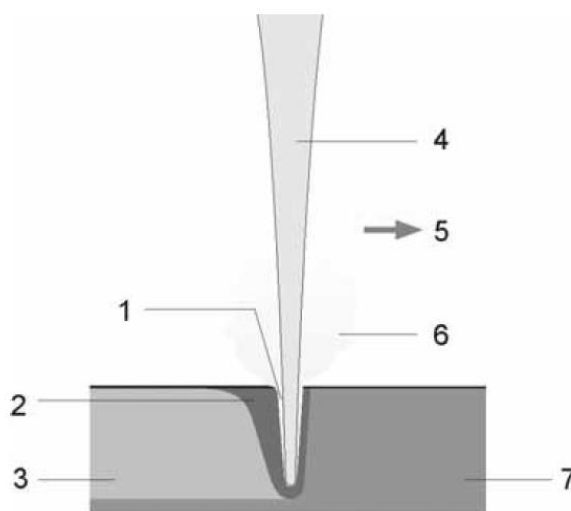
1. Condução – Este modo de soldadura é caracterizado por uma baixa densidade de potência ( $10^4$ - $10^6$  W.cm<sup>-2</sup>), resultando um cordão com pouca penetração. O feixe laser derrete o material ao longo do cordão e quando este solidifica forma o cordão de soldadura. Este modo é geralmente utilizado para soldar peças de reduzida espessura, Figura 15 [17][22][26];



- |                          |                         |                 |
|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| 1. Material fundido;     | 2. Cordão de soldadura; | 3. Feixe laser; |
| 4. Direção de soldadura; | 5. Material a soldar;   |                 |

Figura 15 - Representação esquemática do princípio de soldadura por condução [17]

2. Condução/penetração – Este modo ocorre quando a densidade de potência ronda o ponto crítico de  $10^6 \text{ W.cm}^{-2}$ . O resultado é um cordão com maior penetração do que no modo anterior [22][26];
3. Penetração ou *keyhole* – Este modo de soldadura define-se por grandes penetrações de soldadura e requer elevadas densidades de potência (mais de  $10^6 \text{ W.cm}^{-2}$ ). Neste processo, o feixe laser atinge a peça e rapidamente eleva a temperatura da mesma até ao ponto de fusão. Assim que o material começa a derreter começa também a libertar vapor. O vapor que é dissipado exerce pressão no material fundido mantendo a cavidade aberta durante a soldadura. Assim, o laser consegue alcançar a zona de fusão da peça em zonas mais profundas originando soldaduras de penetração mais elevadas. O resultado é um profundo buraco estreito, cheio de vapor denominado *keyhole*. A profundidade da soldadura pode ser dez vezes maior do que a largura do cordão. Este modo de soldadura é característico de lasers contínuos com elevada potência ou lasers pulsados com elevada energia, Figura 16 [17][22][26];



- |                       |                          |                         |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1. <i>Keyhole</i> ;   | 2. Material fundido;     | 3. Cordão de soldadura; |
| 4. Feixe laser;       | 5. Direção de soldadura; | 6. Vapor;               |
| 7. Material a soldar; |                          |                         |

Figura 16 - Representação esquemática do princípio de soldadura por penetração [17]

### 2.3.2. Defeitos de soldadura

Uma soldadura ideal seria dotada de uma continuidade total entre os elementos a ligar de tal forma que fosse impossível distinguir a junta dos elementos ligados. Porém, este objetivo é



praticamente impossível de alcançar na prática, o que não significa que não se consigam obter ligações soldadas de elevada fiabilidade [24].

Durante a operação de soldadura ocorrem vários fenómenos, que acompanham a transformação do material desde o estado líquido até ao arrefecimento completo da ligação. Estes fenómenos estão ilustrados na representação esquemática da Figura 17.

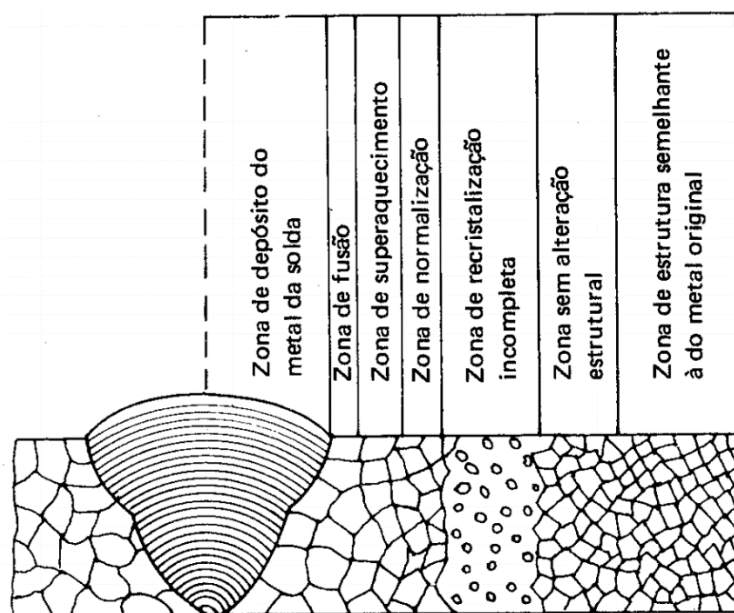


Figura 17 - Representação esquemática dos fenómenos metalúrgicos que ocorrem na soldadura de um aço [27]

Próximo do metal depositado encontra-se a zona de fusão, onde se observa uma transição entre o metal depositado ou fundido e o metal base em que, durante um certo tempo, ocorreu fusão parcial e se deu a mistura das fases sólida e líquida. Na zona de sobreaquecimento houve um aumento do tamanho do grão e formação de uma estrutura acicular. Esta é a zona mais frágil da junta. A zona de normalização resulta numa redução do tamanho dos grãos o que se traduz numa melhoria das propriedades mecânicas. À medida que a distância à zona do metal depositado vai aumentando, verifica-se uma menor influência na estrutura do material, pois essas zonas foram menos afetadas pelo calor. Por vezes, estas zonas sofrem recristalização mas este fenómeno pode ser provocado por deformação plástica antes da soldadura [27].

Este fenómeno que ocorre durante o processo de soldadura, cujo calor do material em fusão é conduzido para a sua vizinhança provocando uma alteração na microestrutura do material afetado pelo calor, é considerado um defeito de soldadura e é conhecido por zona termicamente afetada (ZTA). A Figura 18 representa o defeito térmico descrito.

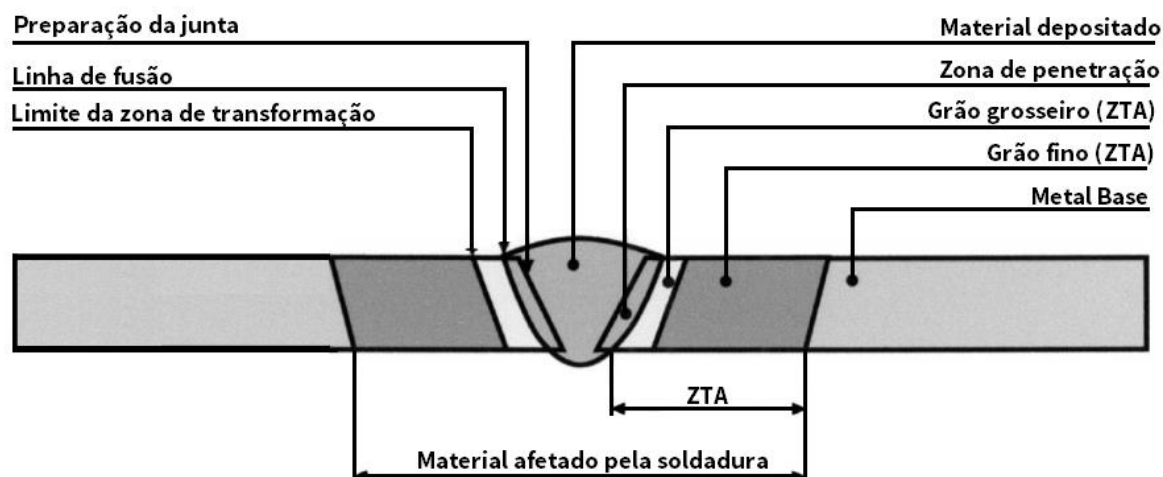


Figura 18 - Identificação das regiões características de uma junta soldada [28]

Para que se consigam soldaduras de boa qualidade é necessário fazer com que a peça aqueça o mínimo possível e que qualquer aquecimento da peça possa dissipar-se rapidamente [17].

Para além do defeito térmico de soldadura acima descrito, o processo de soldadura laser pode ser acompanhado por defeitos externos e internos de soldadura.

#### 2.3.2.1. Defeitos externos de soldadura

Para que se consiga uma boa soldadura, esta deve estar isenta de quaisquer defeitos internos ou externos. Os defeitos externos mais comuns estão representados na Figura 19.

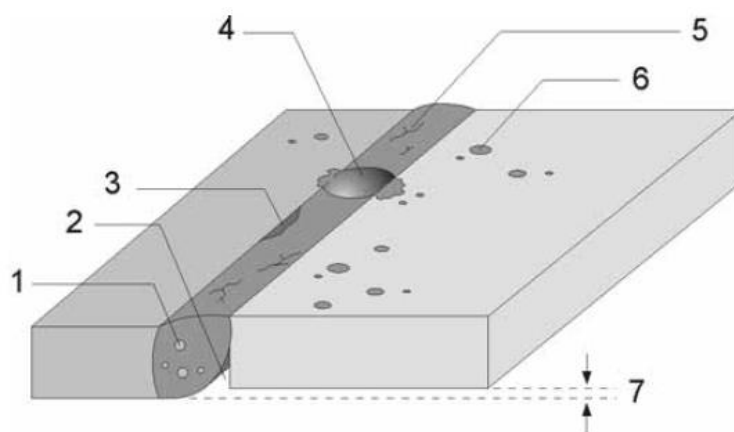


Figura 19 - Defeitos externos de soldadura [17]

- |                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 1. Poros;                       | 5. Fissuras; |
| 2. Bordos queimados;            | 6. Salpicos; |
| 3. Fusão incompleta;            |              |
| 4. Material expelido, crateras; |              |
| 7. Desalinhamento da junta.     |              |

### 2.3.2.2. Defeitos internos de soldadura

Os defeitos internos de soldadura mais comuns estão ilustrados na representação esquemática da Figura 20.

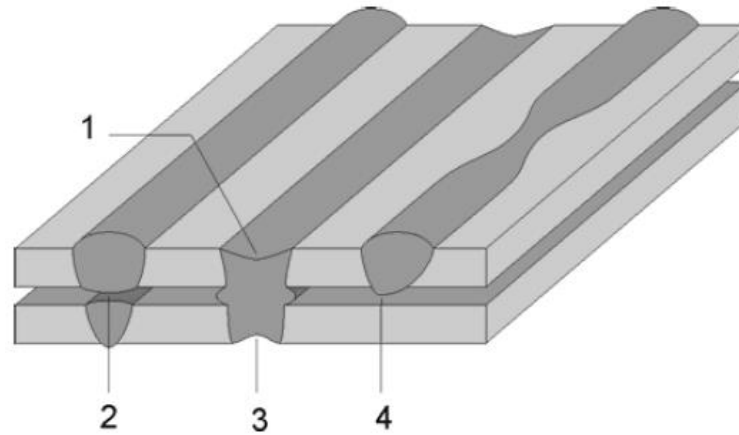


Figura 20 - Defeitos internos de soldadura [17]

1. Abatimento do cordão de soldadura;
2. Separação das chapas devido ao grande intervalo no encosto das chapas;
3. Concauidade da raiz;
4. Falta de penetração devido ao encosto imperfeito das chapas a soldar.

### 2.3.3. Qualidade da soldadura

O controlo de qualidade de uma soldadura é extremamente importante pois visa garantir se a peça soldada vai executar de forma fiável a função para a qual foi concebida [10].

Para que se consiga obter uma boa soldadura é preciso ter em conta os seguintes parâmetros:

- A largura e a profundidade do cordão de soldadura, uma vez que isto determina a resistência da soldadura [17];
- A estrutura interna da soldadura, a qual deve ser o mais uniforme possível e ter os grãos o mais pequeno possíveis [17];

## 2.4. Aços de alta resistência

### 2.4.1. Breve enquadramento

As chapas feitas com aços avançados de alta resistência são uma das principais respostas face às restrições do consumo de energia e aos efeitos no meio ambiente. O caso da indústria automobilística é emblemático, já que cada vez mais é necessário reduzir o peso dos automóveis para diminuir o consumo de combustível e, assim, diminuir o seu custo e a agressão ecológica associados ao seu uso [29]. Além disso, a preocupação crescente com a segurança dos passageiros e requisitos de resistência ao impacto fazem parte de um novo projeto de veículo a ser desenvolvido nos próximos anos [30].

Os aços avançados de alta resistência têm sido os principais candidatos para reduzir a massa dos veículos sem colocarem em risco a segurança dos passageiros. A massa de um carro pode ser reduzida em cerca de 25% usando aços de alta resistência e processos inovadores [3][31][32].

Estes aços têm ganho especial importância nos últimos anos pois oferecem uma boa resistência mecânica, sem afetar a ductilidade, proporcionando o aumento da absorção de energia, melhorando a resistência ao impacto [30].

São considerados aços avançados de alta resistência os que possuem uma tensão de rutura superior a 700 MPa [33].

Os aços avançados de alta resistência podem ser divididos nas seguintes categorias [33]:

- Aços *dual-phase* (DP);
- Aços ferrítico-bainíticos (FB);
- Aços *complex-phase* (CP);
- Aços martensíticos;
- Aços TRIP;
- Aços TWIP.

A Figura 21 faz uma comparação entre as propriedades dos vários tipos de aço.

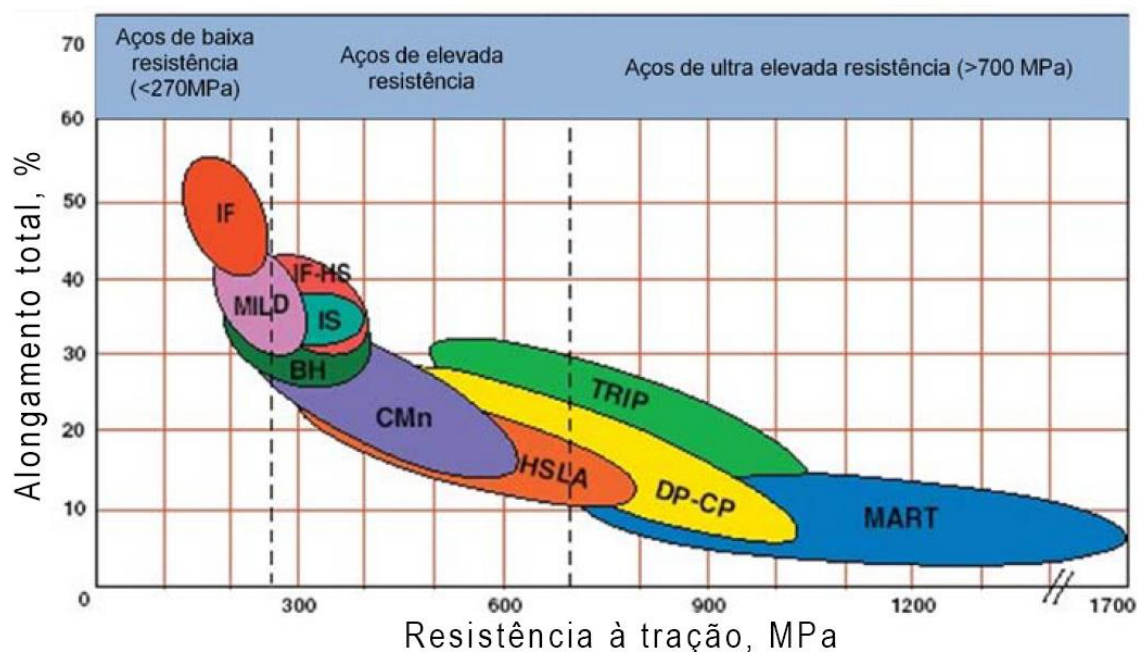


Figura 21 - Esquema que compara os diferentes tipos de aço [31]

Os aços ferrítico-bainíticos (FB) são obtidos por laminação a quente e são detentores de uma microestrutura refinada de ferrite com uma segunda fase de bainite. O reforço é obtido através da refinação do grão e endurecimento proporcionado pela presença da segunda fase. Este material define-se pelas suas boas propriedades de resistência à fadiga, boa soldabilidade e bom desempenho relativo ao impacto [30].

Os aços de fase complexa, referidos na literatura por *Complex-phase*, são caracterizados por uma microestrutura muito fina de matriz ferrítica e uma fração volumétrica alta de fases mais duras, como martensite e bainite, com um reforço adicional de precipitados de nióbio, titânio ou vanádio. Estes aços possuem uma alta capacidade de absorção de energia de deformação [30].

Os aços martensíticos possuem uma microestrutura com cerca de 100% de martensite e pouca quantidade de ferrite e/ou bainite. O carbono é ainda adicionado a este material com o objetivo de aumentar o endurecimento e a resistência. Manganês, silício, cromo, molibdênio, boro, vanádio e níquel também são usados em várias combinações para aumentar o endurecimento [30].

Os aços TRIP (*TRansformation Induced Plasticity*) são materiais cujo aumento de resistência e ductilidade pode ser realizado através de uma transformação martensítica. Estes aços oferecem boas propriedades de resistência e ductilidade devido à sua microestrutura complexa, que

associa ferrite pró-eutetóide, bainite e frações significativas de austenite retida, gerada no final de um esquema de tratamento térmico específico [30].

O aço *dual-phase* 1000 é o material utilizado no presente estudo, pelo que a sua descrição vai ser mais detalhada que os restantes aços.

## 2.4.2. Aços *dual-phase* (DP)

### 2.4.2.1. Microestrutura

Os aços bifásicos são referidos na literatura como *dual-phase steels*. O termo *dual-phase* refere-se à classe dos aços de alta resistência que são compostos por duas fases. Uma das fases contém uma matriz de ferrite enquanto que a outra contém uma estrutura de martensite dispersa em forma de ilhas [34][35]. As ilhas de martensite, dispersas na matriz ferrítica, atuam como obstáculo ao movimento das deslocações e contribuem para a melhoria da resistência mecânica. A fase martensítica tem efeito benéfico na vida do material, no que respeita à fadiga, pois pode retardar ou impedir o crescimento de fissuras [35]. A Figura 22 mostra uma representação esquemática da microestrutura de um aço DP e a Figura 23 ilustra uma fotografia obtida por microscopia da microestrutura de um aço DP.

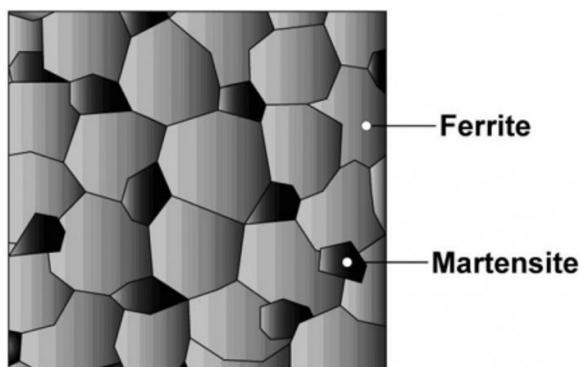


Figura 22 – Representação esquemática da microestrutura típica de um aço DP [36]

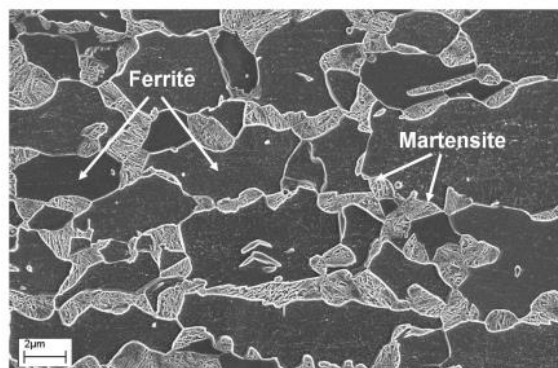


Figura 23 – Fotografia ao microscópio da microestrutura típica de um aço DP [34]

As propriedades mecânicas destes aços são controladas pela fração volumétrica de martensite e pelo tamanho do grão da ferrite. A fase ferrítica é geralmente contínua, conferindo excelente ductilidade a estes aços. Quando estes aços deformam, a deformação é concentrada na fase ferrítica de menor resistência envolvendo as ilhas de martensite, criando uma taxa de encruamento excecional. A taxa de encruamento somada a um excelente alongamento confere



aos aços DP um limite de resistência à tração maior quando comparado com os aços convencionais com limite de elasticidade semelhante [30].

#### 2.4.2.2. Processamento

Os aços DP podem ser obtidos de duas formas [30]:

- Laminados a quente e com arrefecimento controlado da fase austenítica;
- Laminados a frio e continuamente recozidos a partir do campo bifásico (ferrite + austenite), pela transformação de uma parte da austenite em ferrite antes que um arrefecimento rápido transforme a austenite restante em martensite.

A Figura 24 mostra uma representação esquemática da produção de aço *dual-phase*.

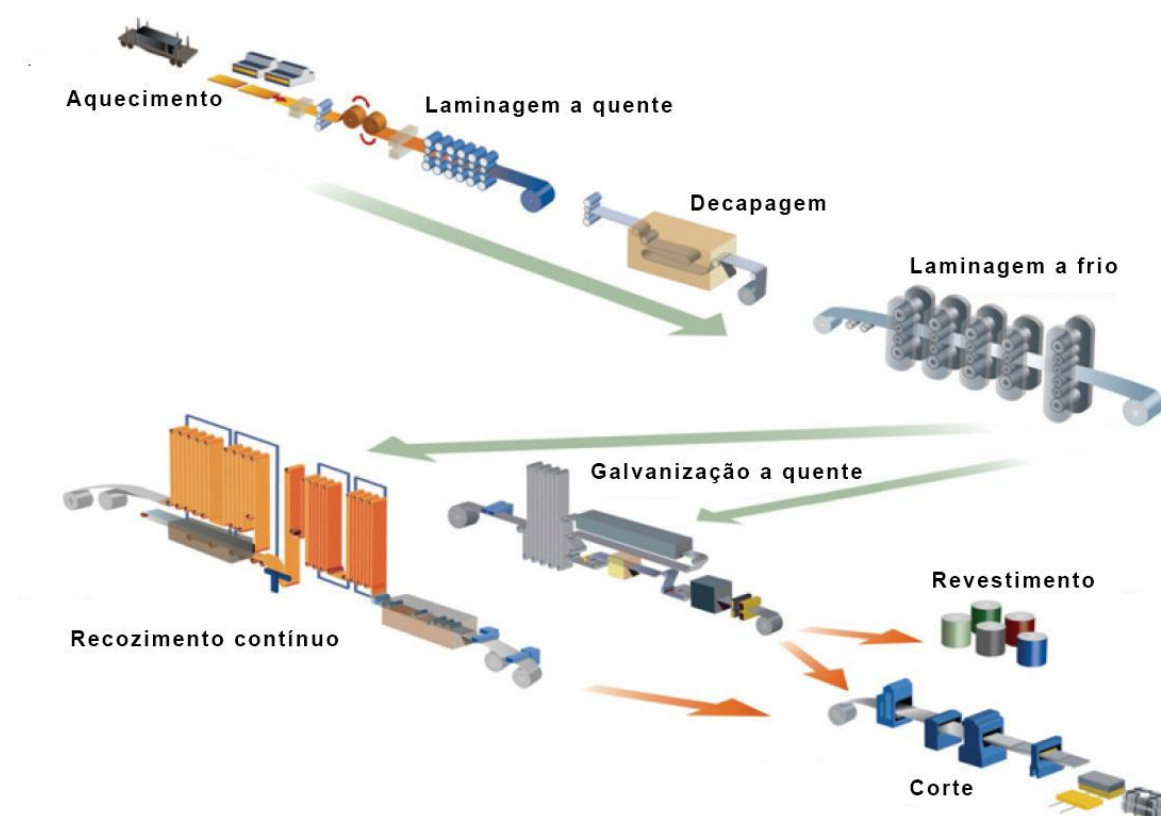


Figura 24 – Representação esquemática da produção de aço *dual-phase* [34]

#### 2.4.2.3. Aplicações

Estes aços surgiram para satisfazer as necessidades e exigências rigorosas da indústria automóvel.

Dadas as boas características que definem os aços *dual-phase*, estes têm vindo a ser cada vez mais utilizados e prevê-se que a sua utilização continue a aumentar significativamente, como mostra a Figura 25.

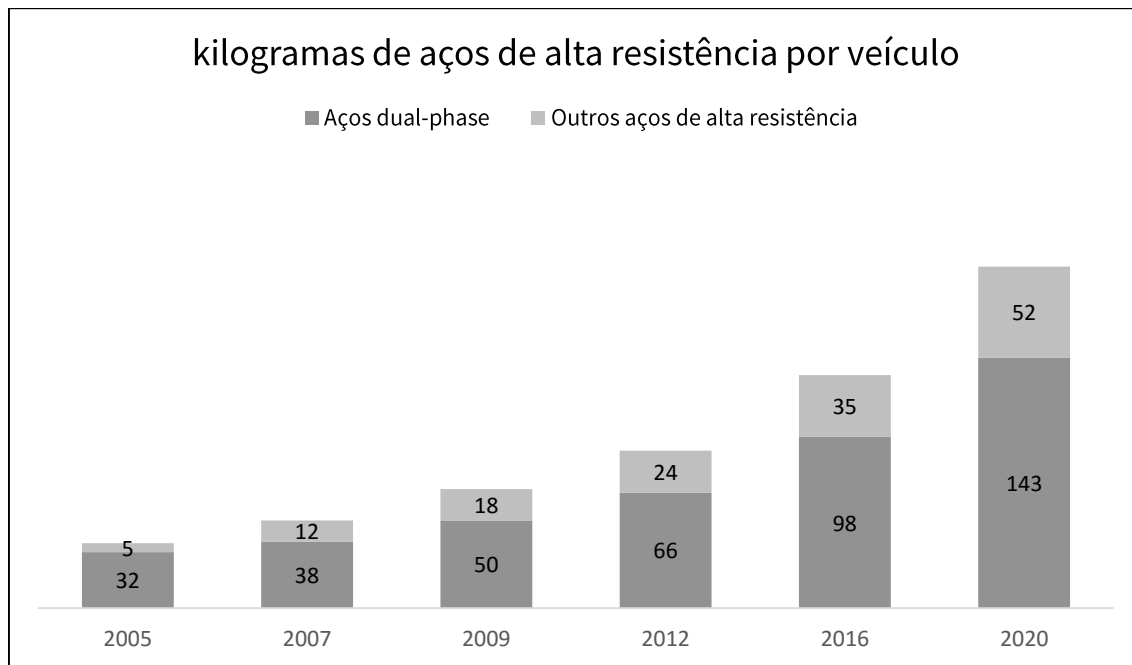


Figura 25 – Crescimento dos aços de alta resistência na indústria automóvel [37]

Graças à boa combinação de elevada resistência e elevada taxa de deformação, o que significa uma grande capacidade de absorção de energia, os aços DP são especialmente usados na indústria automóvel para a construção de componentes de segurança [34]. A Tabela 1 mostra a aplicação dos diversos tipos de aço *dual-phase*.

Tabela 1 - Aplicações dos aços *dual-phase* na indústria automóvel

Aços <i>dual-phase</i>	Aplicações
DP300/500	Tejadilho, parte exterior da porta, painéis exteriores, painel do piso
DP350/600	Painel do piso, capô, para-choques, reforços do piso
DP500/800	Partes interiores, reforços internos traseiros, reforços de choque traseiros
DP600/980	Componentes gaiola de segurança (túnel do painel de piso, berço do motor, assentos)
DP700/1000	Barras do tejadilho



#### 2.4.2.4. Propriedades do aço DP1000

Na Tabela 2 e Tabela 3 são mostradas as propriedades mecânicas e a composição química de uma amostra de aço DP1000 respetivamente.

*Tabela 2 - Propriedades mecânicas [38]*

Tensão de cedência [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Deformação máxima [%]	Dureza [HV0.5]
802	1099	5	325

*Tabela 3 - Composição química [38]*

Composição química ( % massa)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.123	0.484	1.44	0.0102	0.0016	0.0122	<0.005	0.0275
Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	B
0.0433	0.0161	0.0105	0.0156	0.0045	0.007	<0.010	0.0002

Naturalmente, estes valores podem ser diferentes para amostras diferentes do mesmo material. Contudo, estes valores servem como indicadores das propriedades mecânicas e da composição química do aço DP1000.

## 2.5. Parâmetros de soldadura

Para se alcançar soldaduras de boa qualidade é necessário garantir uma boa combinação entre os vários parâmetros de soldadura. Estes podem ser divididos em duas categorias. Os que dizem respeito ao material a soldar e os parâmetros do laser [22].

### 2.5.1. Parâmetros do material

A soldadura laser é um processo em que o equipamento de soldadura não necessita de estar em contacto com a peça a soldar. Desta forma, o laser é capaz de soldar áreas de difícil acesso. Porém, uma vez que este tipo de soldadura não requer o uso de material de adição, é necessário garantir que as peças estão completamente encostadas para que se consiga uma boa soldadura. Os melhores resultados conseguem-se quando o espaçamento é nulo entre as peças a soldar. No entanto, quando não é possível garantir este encosto total, define-se que o espaçamento máximo admissível entre as peças a soldar seja de aproximadamente 10% da espessura da peça de menor espessura [22]. Naturalmente, à semelhança com, por exemplo, o processo TIG, também no laser é possível adicionar material de adição mediante a utilização de uma vareta ou um fio.

Ainda que as peças a soldar se encontrem completamente encostadas, a soldadura depende das propriedades do material (densidade, condutividade térmica, calor específico, calor latente de fusão, espessura, etc) [26].

À temperatura ambiente, a maior parte dos metais têm uma capacidade de absorção cerca de 10% - 20%. À medida que o metal é aquecido a sua capacidade de absorção vai aumentando atingindo capacidades de absorção de 80% - 90% [26].

O calor,  $Q$ , necessário para derreter o material de massa  $m$  é dado pela Equação (1) [39]:

$$Q = m[c(T_m - T_0) + L_m] \quad (1)$$

Onde  $c$  é o calor específico,  $T_m$  é a temperatura de fusão,  $T_0$  é a temperatura inicial e  $L_m$  é o calor latente de fusão. No caso específico de soldadura laser contínua, a equação anterior pode ser transformada na Equação (2) [39]:

$$\frac{Q}{t} = \rho D h v [c(T_m - T_0) + L_m] \quad (2)$$

Onde  $Q/t$  representa a potência necessária para derreter o material,  $\rho$  a densidade,  $D$  o diâmetro do feixe,  $h$  a penetração e  $v$  a velocidade de soldadura. Assim, a penetração  $h$  pode ser expressa através da seguinte Equação (3) [39]:

$$h = \frac{\frac{Q}{t}}{\rho D v [c(T_m - T_0) + L_m]} \quad (3)$$

Incluindo a absorção da superfície do material e as perdas de calor por condução, a penetração pode ser estimada através da Equação (4) [39]:

$$h = K \frac{P}{D v} \quad (4)$$

onde  $P$  é a potência do laser e  $K$  é uma constante que depende das propriedades físicas do material. Assim, a penetração  $h$  da soldadura é proporcional à potência do feixe laser e inversamente proporcional ao diâmetro  $D$  do feixe e à velocidade de soldadura  $v$ .

Apesar desta equação só ser válida para soldadura laser contínua, espera-se estudar a veracidade desta equação para soldadura laser pulsado, que é âmbito de estudo deste trabalho de investigação.

### 2.5.2. Parâmetros do laser

Os parâmetros do laser determinam a soldadura que se pretende fazer. Estes parâmetros podem ser os seguintes:

- I. Potência – Define a potência máxima de cada pulso;
- II. Duração do pulso – Define a duração de cada pulso;
- III. Sobreposição – Define a sobreposição dos pulsos. Uma sobreposição de 0% significa que os pulsos não se sobrepõem e uma sobreposição de 100% significaria que os pulsos se sobreporiam na totalidade, o que significa que não se conseguiria formar um cordão de soldadura. A Figura 26 ilustra um exemplo de sobreposição de 50%.

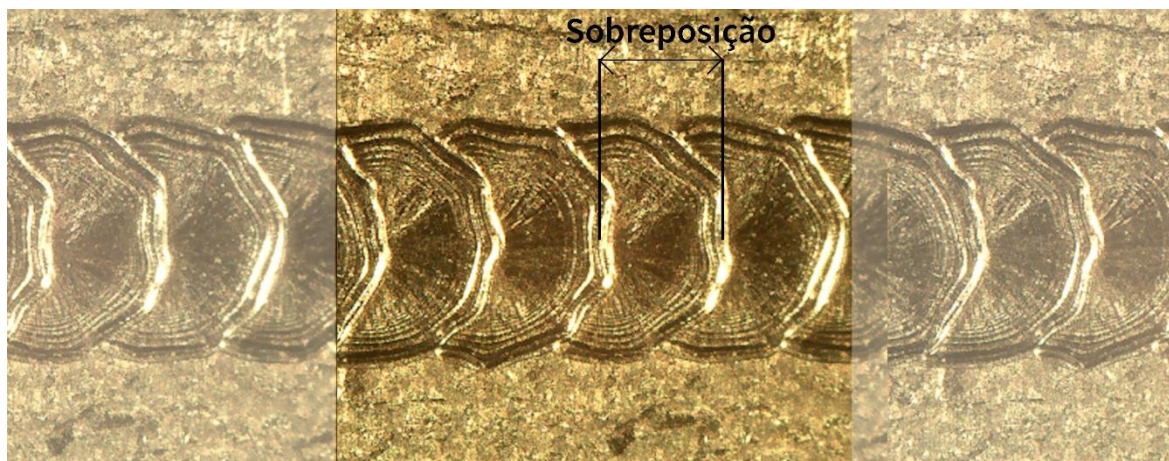


Figura 26 – Sobreposição de 50%

A sobreposição pode ser calculada através da Equação (5) [26]:

$$\text{Sobreposição} = \frac{\text{Velocidade de soldadura}}{\text{Diâmetro do feixe laser} \times \text{frequência dos pulsos}} \times 100 [\%] \quad (5)$$

Soldaduras com boas propriedades mecânicas são geralmente alcançadas com sobreposições entre os 40% - 60%. No entanto, para aplicações onde é necessário garantir a estanquicidade aconselham-se sobreposições de 70% - 85% [22][26].

- IV. Diâmetro – Define o diâmetro do feixe laser. Para os mesmos parâmetros, um diâmetro reduzido significa uma densidade de potência elevada ( $\text{W}/\text{mm}^2$ ) enquanto que um diâmetro elevado significa uma densidade de potência reduzida;
- V. Tipo de pulso – Define a forma do pulso. Existem muitos formatos de pulso. A forma de pulso mais utilizada é a quadrada [22];
- VI. Velocidade – Define a velocidade de soldadura. A velocidade pode ser determinada através da Equação (5).

A Figura 27 apresenta o método de cálculo da energia do pulso.

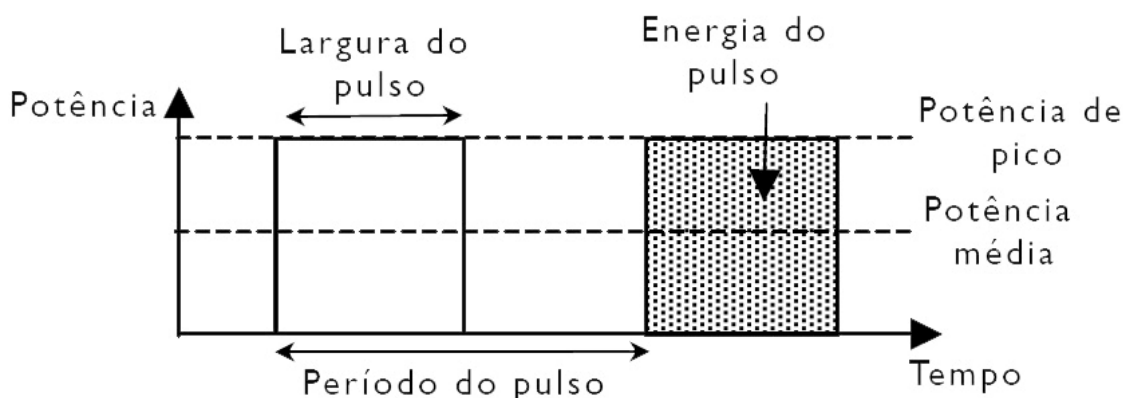


Figura 27 – Importância dos parâmetros laser na forma do pulso [22]

A energia que está contida num pulso e que é emitida para a peça a soldar é o produto da potência de pico pela duração/largura do pulso. A energia do pulso pode assim ser traduzida na Equação (7) [22][26]:

$$E_p = P_p \times t \quad (7)$$

Em que:

- $E_p$  é a energia do pulso e é indicada normalmente em Joule (J);
- $P_p$  é a potência de pico do pulso e é indicada normalmente em Watt (W);
- $t$  é a duração do pulso e é indicada normalmente em segundos (s);

Quando se faz um cordão de soldadura, aplica-se sucessivos pulsos laser. A energia média durante um pulso obtém-se através da Equação (8) [22][26]:

$$E_m = E_p \times f \quad (8)$$

Em que:

- $E_m$  é a energia média do pulso e é indicada normalmente em Joule (J);
- $E_p$  é a energia de pico do pulso e é indicada normalmente em Joule (J);
- $f$  é a frequência do pulso e é indicada normalmente em Hertz (Hz);

A soldadura criada por cada pulso laser é determinada pela densidade de potência e pela duração do pulso. O número de pulsos por segundo ou a sobreposição dos pulsos e a velocidade definem o cordão de soldadura [22].

Em comparação com os métodos convencionais, a soldadura laser pulsada causa taxas de aquecimento e arrefecimento maiores que resultam numa alteração da microestrutura do material [26].

Para que se consigam boas soldaduras é necessário existir uma boa combinação entre todos estes parâmetros. Naturalmente, é fundamental saber qual a influência destes parâmetros na soldadura.

## **2.6. Influência dos parâmetros de soldadura**

Alguns trabalhos experimentais têm sido realizados com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros do laser pulsado na soldadura de diferentes tipos de metais. Em seguida, pretende-se mostrar os resultados de alguns trabalhos experimentais que servirão de comparação com os resultados desta investigação. Estes testes de comparação nem sempre utilizam o mesmo laser nem utilizam o mesmo material. Porém, estes foram os trabalhos mais idênticos que se encontraram disponíveis.

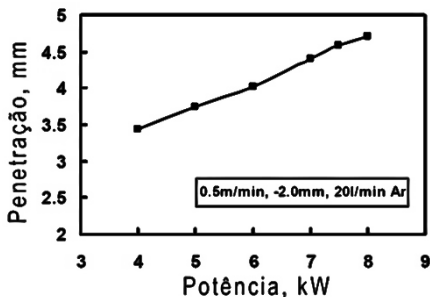
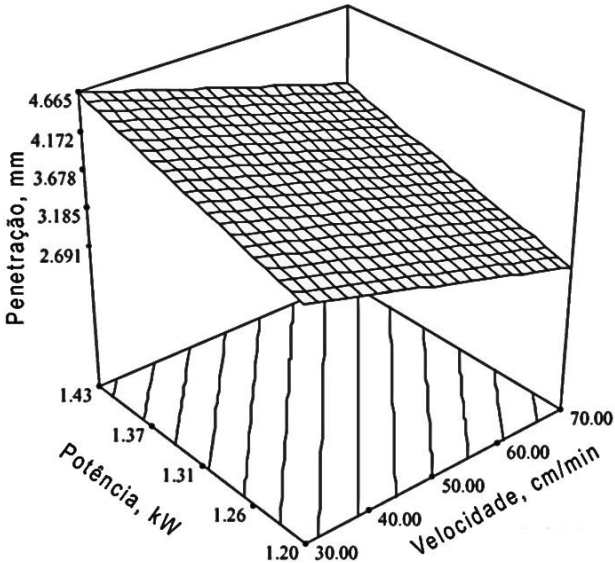
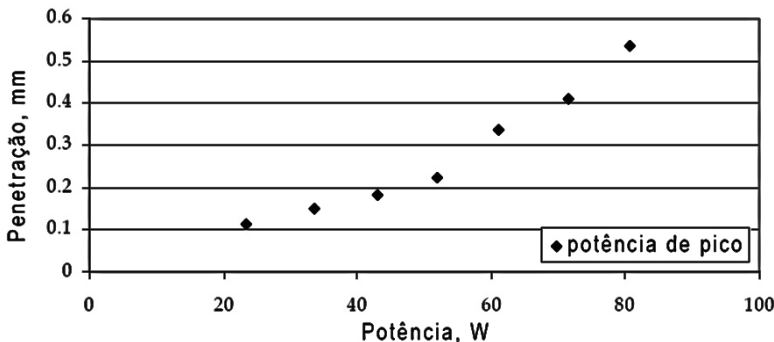
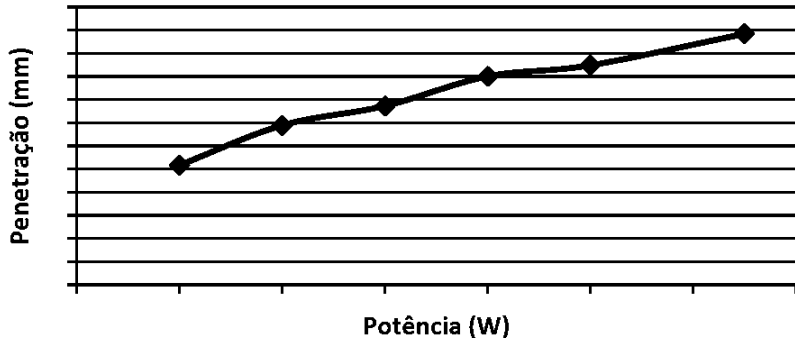
### **2.6.1. Influência da potência**

A Tabela 4 pretende resumir os resultados dos testes experimentais de vários artigos que visam estudar a influência da potência na penetração da soldadura.

Estes testes foram realizados com lasers de CO<sub>2</sub> e de Nd:YAG, com aço carbono e aço inoxidável de diferentes espessuras.

Para qualquer uma das condições destes testes pode-se concluir que a penetração da soldadura aumenta com o aumento da potência do laser.

Tabela 4 - Influência da potência na penetração da soldadura

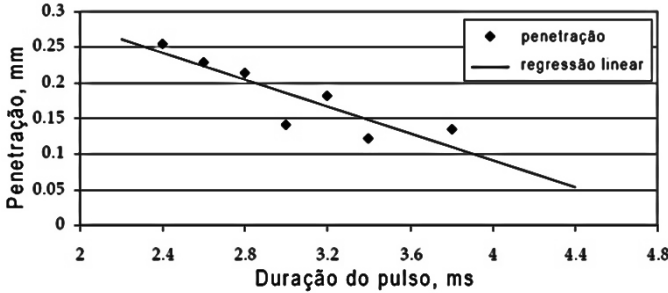
Laser utilizado	Material utilizado	Resultados obtidos	Referência
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço inoxidável de 6.4 mm de espessura		[40]
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço carbono de 8 mm de espessura		[41]
Laser pulsado Nd:YAG	Aço inoxidável de 0.6 mm de espessura		[26]
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço inoxidável AISI 304		[42]



### 2.6.2. Influência da largura do pulso

A Tabela 5 mostra os resultados experimentais de um único artigo que visa estudar a influência da duração do pulso na penetração da soldadura.

Tabela 5 - Influência da largura do pulso na penetração da soldadura

Laser utilizado	Material utilizado	Resultados obtidos	Referência
Laser pulsado Nd:YAG	Aço inoxidável de 0.6 mm de espessura		[26]

Este teste foi realizado com o mesmo tipo de laser mas com diferente material e espessura do trabalho desta dissertação.

Este estudo permite concluir que o aumento da duração do pulso leva a uma diminuição na penetração da soldadura.

### 2.6.3. Influência da sobreposição

A sobreposição é também um parâmetro passível de regular diretamente na máquina de soldadura laser. A Figura 28 mostra uma representação esquemática da influência da sobreposição na penetração da soldadura.



Figura 28 - Influência da sobreposição [22]

Através desta representação, é possível concluir que a penetração máxima atingida pela soldadura não é influenciada pela sobreposição. Contudo, a penetração eficaz, que traduz a penetração na qual é possível ter um cordão sem descontinuidades, é em muito influenciada



pela sobreposição. Uma sobreposição mais baixa significa um cordão contínuo de soldadura com pouca penetração enquanto que um valor de sobreposição elevado significa um cordão contínuo de soldadura com muita penetração. No entanto, não se encontrou qualquer estudo que abordasse este parâmetro para atestar a veracidade desta afirmação.

#### **2.6.4. Influência da velocidade de soldadura**

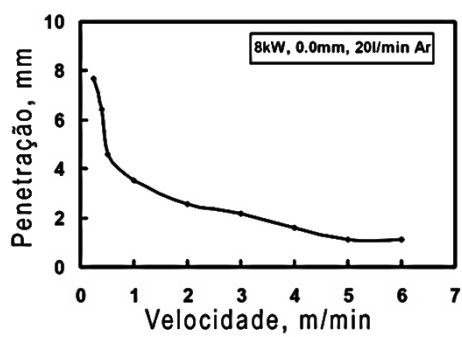
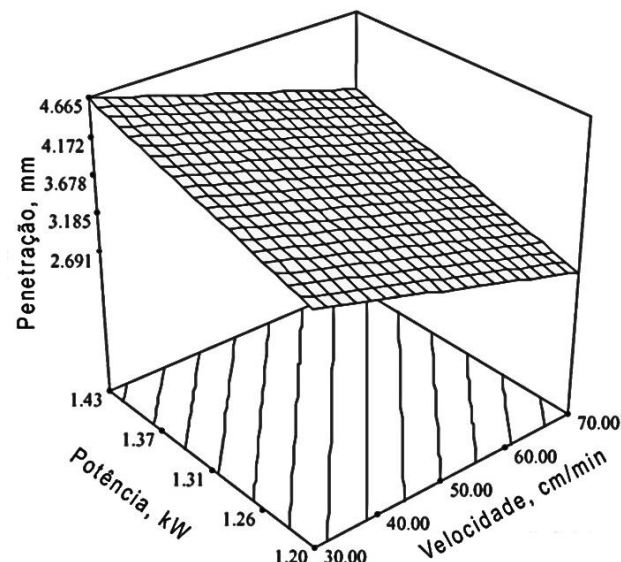
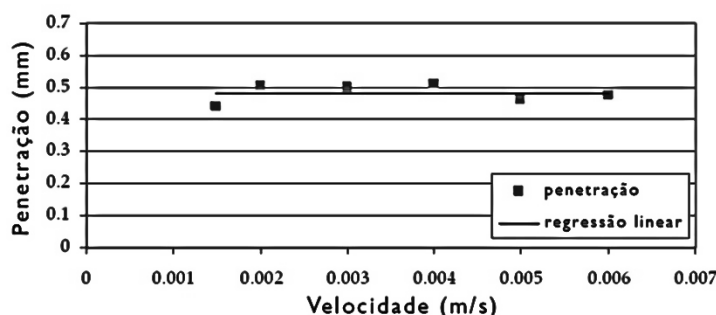
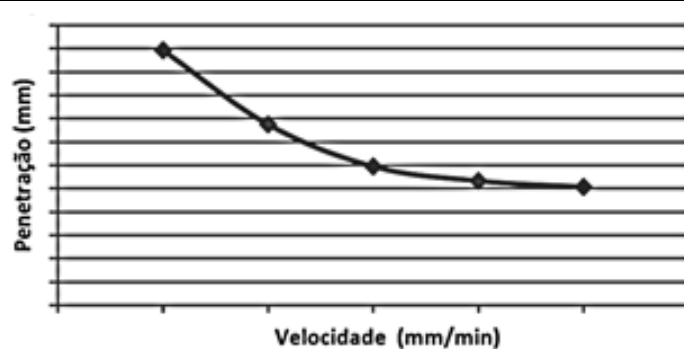
A Tabela 6 pretende resumir os resultados dos testes experimentais de vários artigos que visam estudar a influência da velocidade na penetração da soldadura.

Uma vez mais, estes testes foram todos realizados em condições distintas daquelas que foram utilizadas neste trabalho.

Com exceção do terceiro estudo, todos os restantes partilham os mesmos resultados apesar das divergências das condições em que foram realizados. Estes estudos mostram que um aumento de velocidade leva a uma diminuição na penetração da soldadura. O terceiro estudo não revela qualquer tendência na influência da velocidade na penetração da soldadura.

A espessura da peça determina a velocidade de soldadura necessária para que se consigam soldaduras com penetração adequada. Em geral, para espessuras maiores da peça, serão necessárias velocidades de soldadura menores. O mesmo é dizer que a penetração da soldadura diminui com o aumento da velocidade de soldadura [25].

Tabela 6 - Influência da velocidade na penetração da soldadura

Laser utilizado	Material utilizado	Resultados obtidos	Referência
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço inoxidável de 6.4 mm de espessura		[40]
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço carbono de 8 mm de espessura		[41]
Laser pulsado Nd:YAG	Aço inoxidável de 0.6 mm de espessura		[26]
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço inox AISI 304		[42]

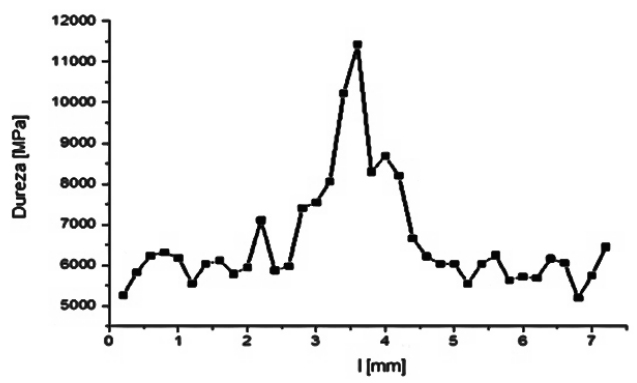
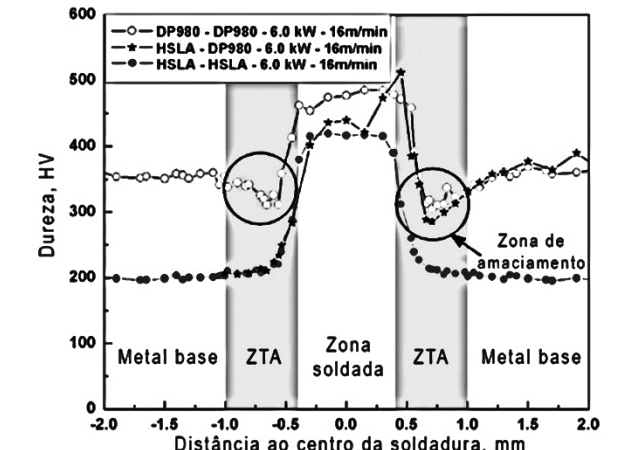
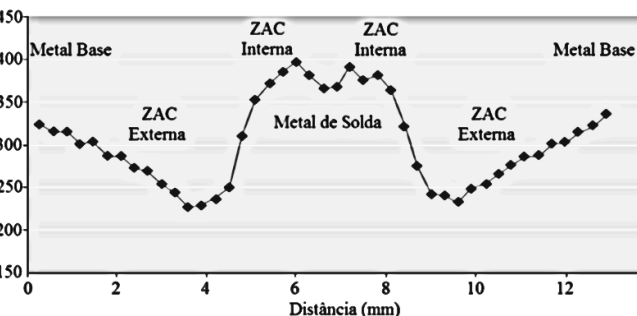
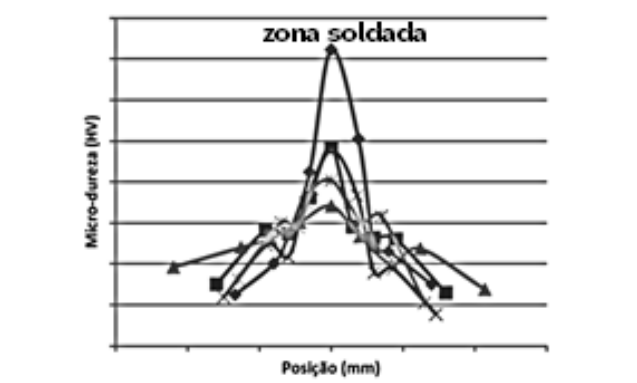
### **2.6.5. Influência da soldadura laser na dureza do material na zona soldada**

A Tabela 7 mostra alguns resultados que visam estudar a influência da soldadura na dureza do material.

A dureza da zona soldada pode ser maior, menor ou equivalente à do material base dependendo do tipo de material. Geralmente, a dureza da zona soldada é mais elevada do que o material base. Este aumento da dureza na zona soldada pode ser devido ao refinamento da microestrutura [25].

Depois de consultada alguma bibliografia, espera-se que as medições de microdurezas revelem uma máxima dureza no cordão de soldadura e uma diminuição de dureza à medida que se afasta do cordão de soldadura.

Tabela 7 – Influência da soldadura laser na dureza do material

Laser utilizado	Material utilizado	Resultados obtidos	Referência
Nd:YAG	DP600 com 0.8mm de espessura		[10]
YLS-6000-S2 (Fiber laser)	DP980 com 1.2mm de espessura		[43]
MAG	Aço DP1000 de 1.2mm de espessura		[44]
Laser de CO <sub>2</sub>	Aço inox AISI 304		[42]



# 3.

## Procedimento experimental

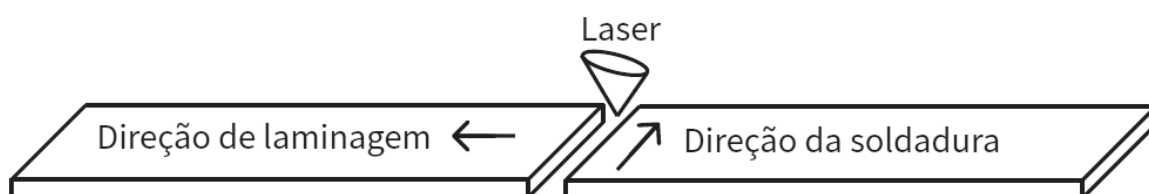
*‘The best preparation for tomorrow is doing your best today.’*

H. Jackson Brown, Jr.

**Neste capítulo pretende-se fazer a descrição de todo o procedimento experimental bem como a metodologia adotada para cumprir com todos os objetivos inicialmente propostos. Em seguida são apresentadas todas as etapas do desenvolvimento deste projeto.**

Para estudar a influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura pretende-se soldar duas amostras topo a topo.

A Figura 29 mostra uma representação esquemática das amostras que se pretendem soldar.



*Figura 29 - Representação esquemática das amostras*

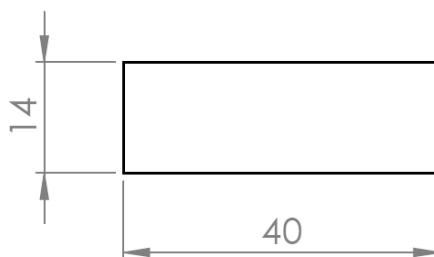
Em seguida mostram-se todas as etapas deste procedimento experimental.

### 3.1. 1ª Parte - Preparação

#### 3.1.1. Material

O material selecionado para este trabalho foi o aço *dual-phase* 1000 com 1 mm de espessura. (As especificações deste material estão descritas no capítulo 2.4.2.4.)

Este material encontra-se na forma de chapas de dimensões 2000×1250×1, pelo que, numa primeira fase, é necessário cortar as chapas de forma a obter amostras de dimensões reduzidas de modo a que estas sejam facilmente soldadas e analisadas sem que exista um grande desperdício de material. Por outro lado, estas amostras devem permitir obter resultados credíveis e conclusivos. As dimensões, em milímetros, das amostras a soldar estão representadas na Figura 30.



*Figura 30 – Dimensões das amostras de aço DP 1000 de 1 mm de espessura*

As amostras foram cortadas na guilhotina da marca Guifil existente no departamento e ilustrada na Figura 31. A Figura 32 mostra algumas amostras cortadas na guilhotina.



*Figura 31 - Guilhotina Guifil*



*Figura 32 – Amostras cortadas na guilhotina*

Foram cortadas 336 amostras de aço DP1000 de 1 mm de espessura. Uma vez que as amostras vão ser soldadas duas a duas, no fim deste projeto ter-se-á 168 provetes soldados de aço DP1000 com 1 mm de espessura.

Todas estas amostras servem o propósito de estudar quer a influência dos parâmetros de soldadura na penetração do material como também para encontrar os parâmetros de soldadura que conferem as melhores características a este material.

Aquando do corte das amostras, teve-se o cuidado para que todas as amostras fossem cortadas segundo a mesma direção de laminagem. Uma vez que o que se pretende estudar são os

parâmetros de soldadura e não a influência da anisotropia, os resultados podem ser comparados sem ter em conta o fator de anisotropia, pois este é igual para todas as amostras.

As amostras vão ser soldadas topo a topo como ilustra a Figura 33.

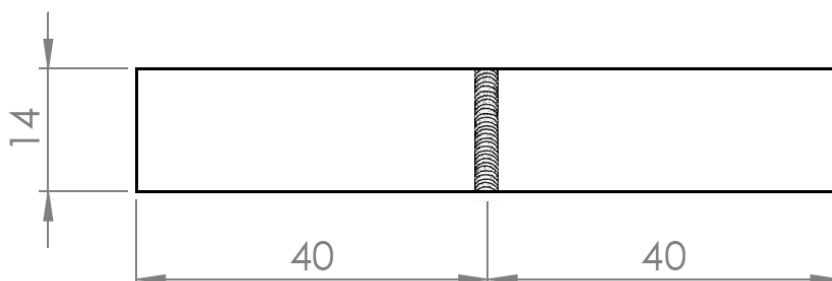


Figura 33 - Amostras de aço *dual-phase* 1000 soldadas topo a topo

Como as amostras vão ser soldadas topo a topo é conveniente que estas tenham o maior contato possível entre elas. No entanto, as operações de corte mecânico produzem por norma descontinuidades, principalmente rebarbas, na região dos bordos [45]. A Figura 34 ilustra um esquema do corte por guilhotina onde é possível ver as irregularidades da superfície cortada.

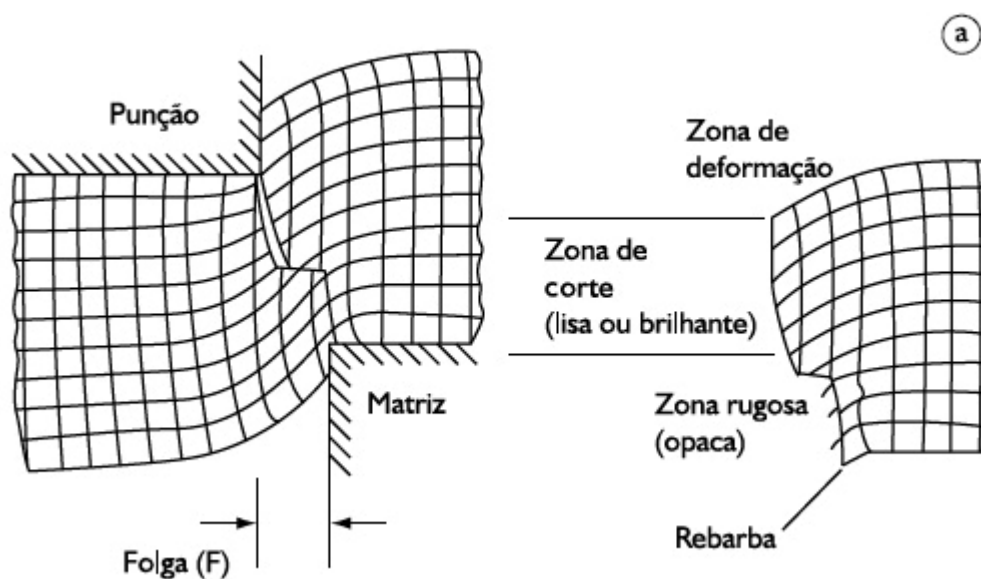
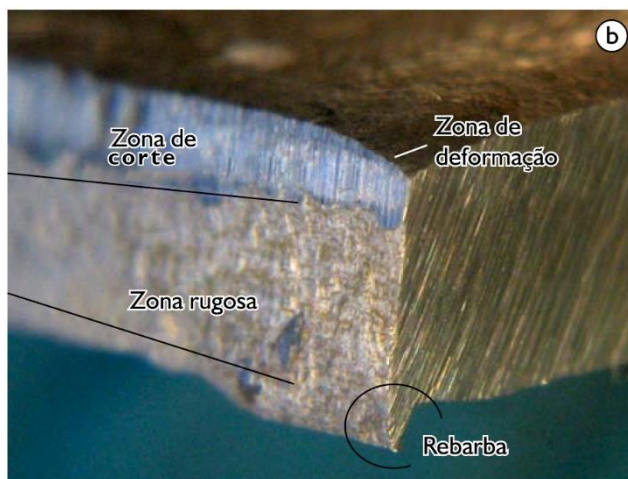


Figura 34 – Esquema de corte por guilhotina [45]

A Figura 35 mostra uma vista de uma superfície típica de uma peça cortada por guilhotina.





*Figura 35 - Vista de uma superfície típica de uma peça cortada por guilhotina [45]*

Os processos de corte envolvem normalmente aquecimento e fusão localizada do material que, por vezes, levam a alterações microestruturais que devem ser consideradas. Isto é, o processo de corte pode influenciar o desempenho do material originando problemas no uso posterior da chapa [45].

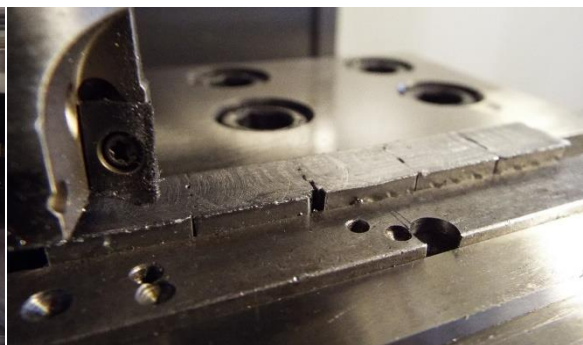
De forma a minimizar as irregularidades e alterações microestruturais das superfícies cortadas na guilhotina e maximizar o encosto entre os topos das amostras, decidiu-se maquinar o topo de cada amostra que se pretende soldar.

Para esta etapa utilizou-se um centro de maquinagem atuado por comando numérico por computador (cnc) MIKRON existente no departamento, ilustrado na Figura 36.

Com uma ferramenta e velocidade adequadas, maquinaram-se os topos das amostras como mostra a Figura 37 tendo o cuidado para que estes não ficassem danificados e que daí resultassem alterações na microestrutura da superfície das amostras que pudessem influenciar os resultados que se pretende analisar.

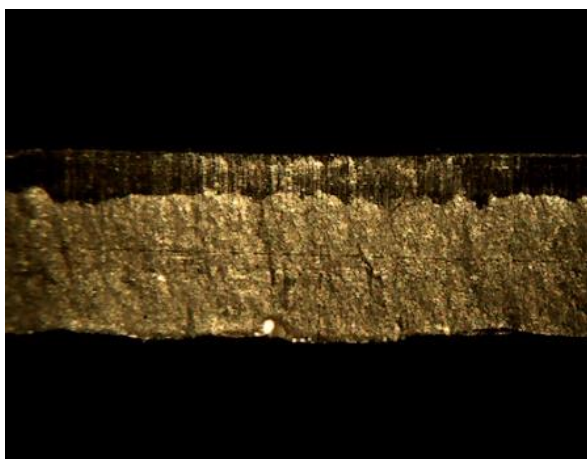


*Figura 36 - Fresadora CNC MIKRON VCE 500*

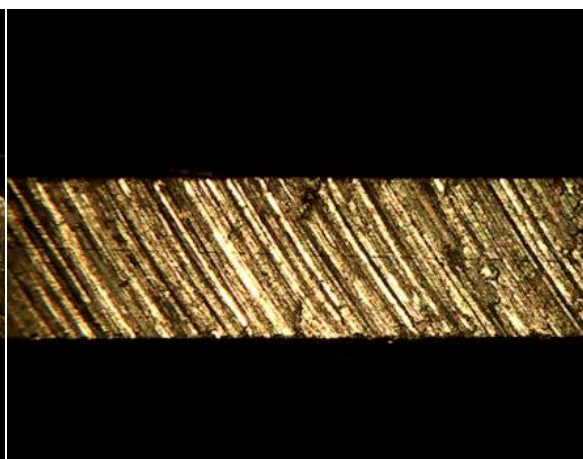


*Figura 37 - Amostras maquinadas na CNC*

A Figura 38 mostra a superfície de uma amostra cortada na guilhotina. Tal como explicado anteriormente, é visível as alterações que este processo de corte induz na superfície da amostra.



*Figura 38 - Superfície do topo de uma amostra após corte por guilhotina*

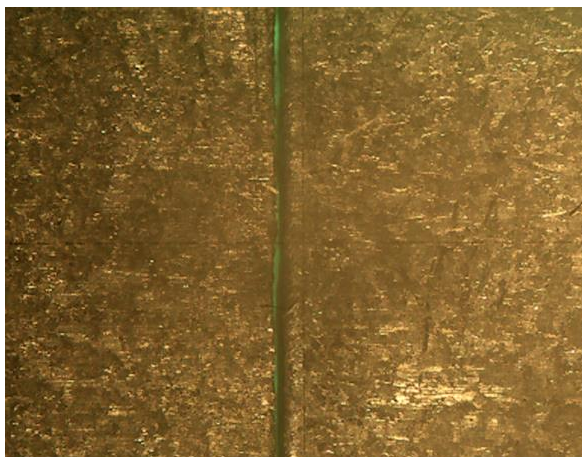
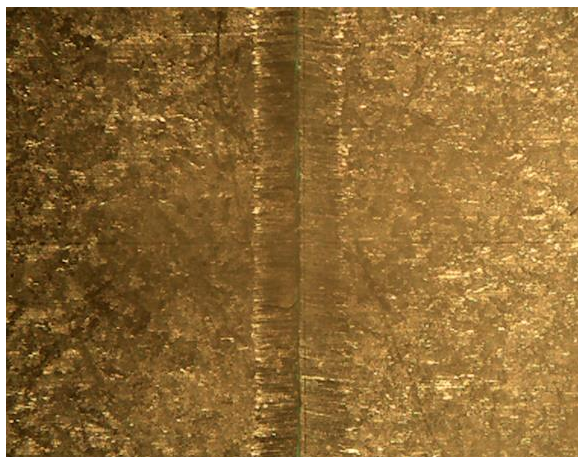


*Figura 39 - Superfície do topo de uma amostra após corte na cnc*

A Figura 39 exibe uma amostra em que o seu topo foi maquinado numa fresadora cnc. Os defeitos provenientes do corte por guilhotina foram assim diminuídos.

Porém, após a maquinagem das amostras foi necessário lixar as mesmas para eliminar algumas rebarbas provenientes deste processo.

A Figura 40 mostra duas amostras encostadas pelos seus topos sem que os mesmos tenham sido maquinados e a Figura 41 mostra duas amostras encostadas pelos seus topos após terem sido maquinados na cnc e posteriormente lixados.

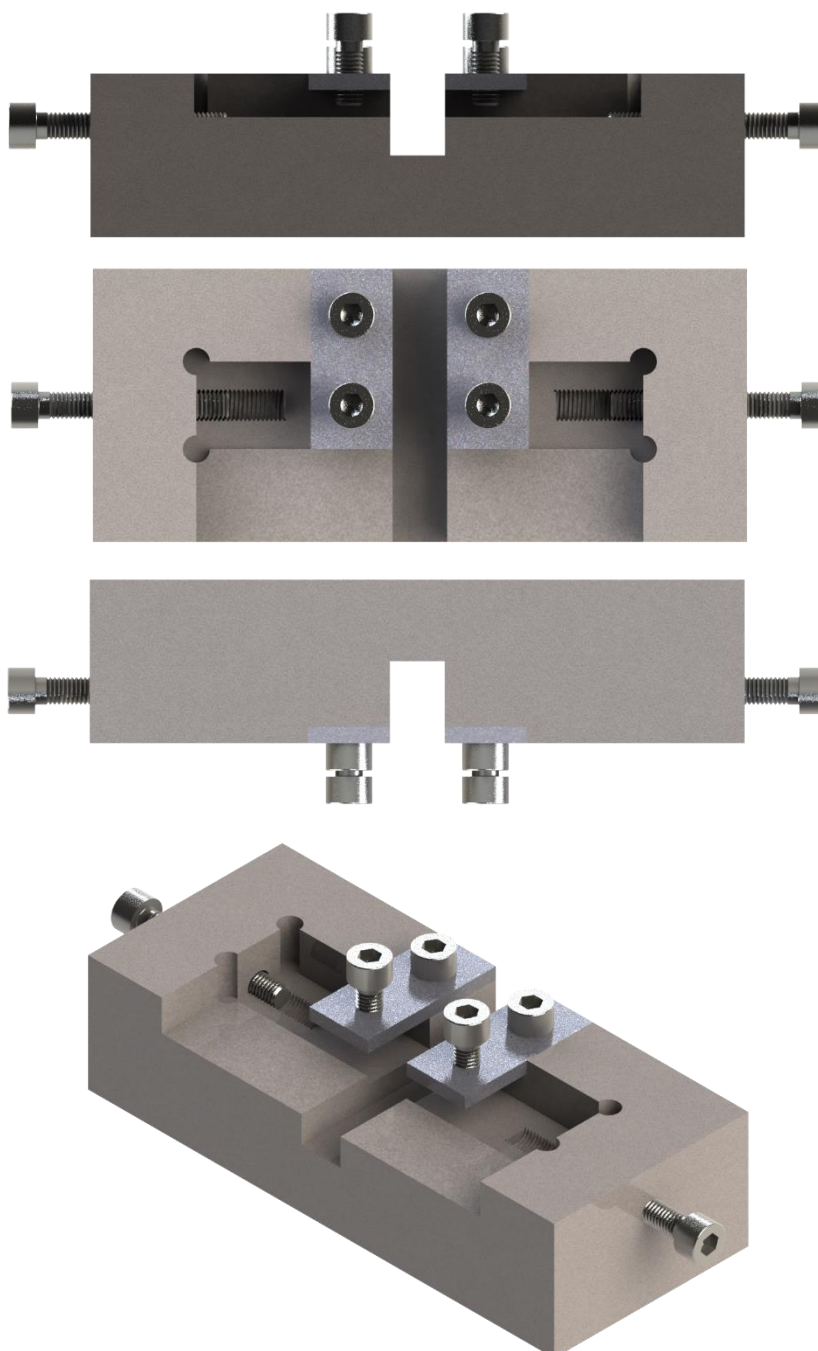
*Figura 40 – Topos não maquinados**Figura 41 – Topos maquinados*

Como se pode observar nas figuras acima, os topos maquinados permitem um encosto maior entre amostras. Com os topos maquinados, nos quais foi passada uma lixa no sentido de remover eventuais rebarbas, garante-se assim uma diminuição dos defeitos provenientes do processo de corte por guilhotina e um maior encosto entre amostras. Por outro lado, assegura-se com que todas as amostras sejam soldadas nas mesmas condições.

Para terminar a preparação das amostras, as mesmas foram lavadas com água e detergente para remover eventuais resíduos e de seguida limpas com acetona para remover quaisquer vestígios de oleosidade.

### 3.1.2. Dispositivo de fixação

Dada a recente aquisição da máquina de soldadura laser, ainda não existia qualquer dispositivo de fixação para as amostras a soldar. Posto isto, torna-se deveras importante conceber um dispositivo de fixação para que todas as amostras sejam soldadas em condições semelhantes. Para tal, foi desenvolvido o dispositivo de fixação ilustrado na Figura 42.

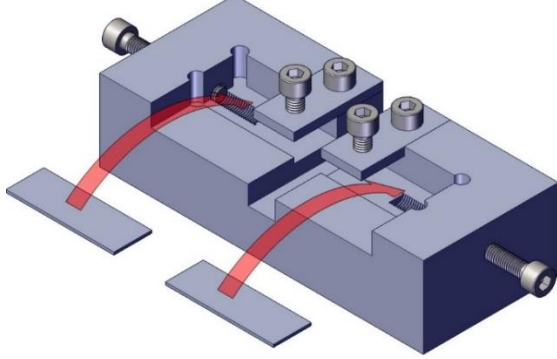
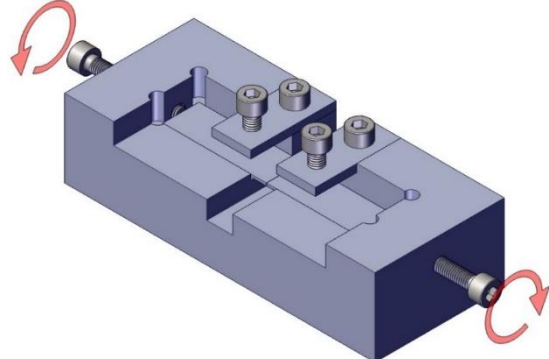
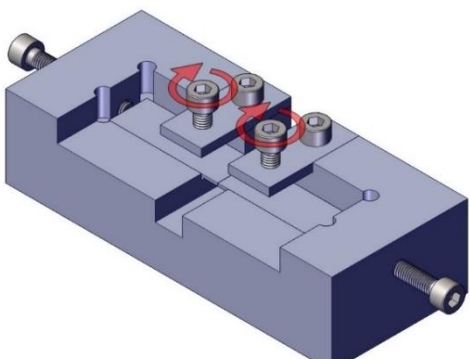


*Figura 42 – Protótipo do dispositivo de fixação (versão 1)*

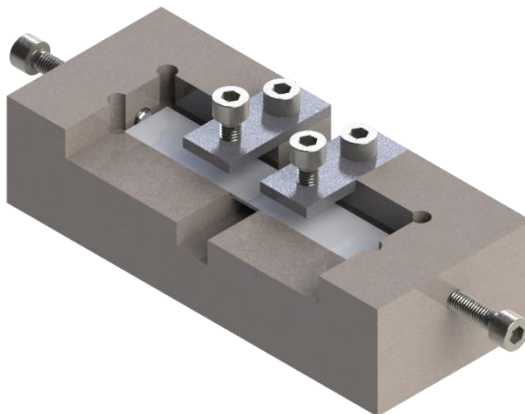


O dispositivo de fixação foi projetado de forma a ser um sistema simples e rápido de usar dado à grande quantidade de amostras que eram necessárias soldar. O funcionamento do dispositivo de fixação das amostras está explicado na Tabela 8.

*Tabela 8 - Funcionamento do dispositivo de fixação*

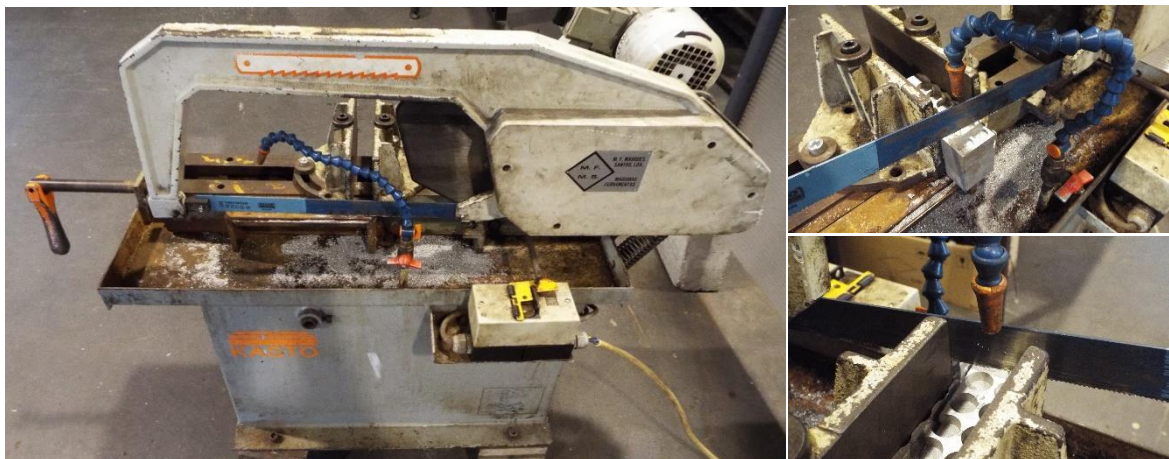
 <p>(a) – Etapa 1</p>	<p>A primeira etapa consiste em colocar as duas amostras que se pretendem soldar no entalhe próprio para o efeito, ilustrado em (a).</p>
 <p>(b) – Etapa 2</p>	<p>A segunda etapa visa proporcionar o encosto máximo entre os topos das amostras. Para isso, apertam-se os parafusos que estão na horizontal, representados em (b).</p>
 <p>(c) – Etapa 3</p>	<p>Por último, basta apertar os parafusos verticais para fixar as amostras e garantir que as duas amostras estão niveladas. Na representação (c) mostram-se os parafusos a operar.</p>

Este dispositivo revelou-se muito fácil e simples de operar e eficaz na fixação das amostras a soldar. A Figura 43 mostra o dispositivo de fixação com duas amostras preparadas para serem soldadas.



*Figura 43 – Protótipo do dispositivo de fixação (versão 1) com amostras preparadas para soldar*

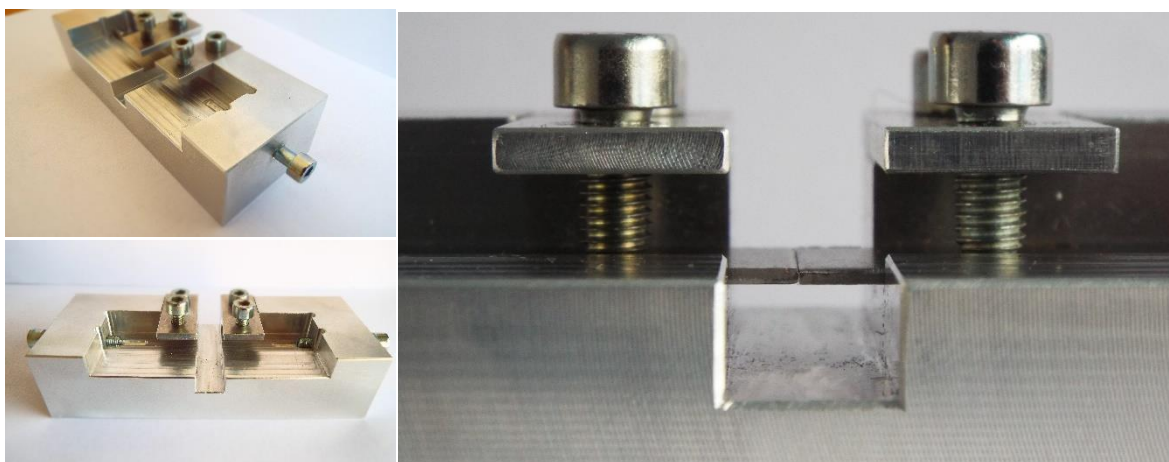
Depois de concebido todo o projeto do dispositivo de fixação foi necessário construí-lo. Para iniciar esta fase, cortou-se um bloco de alumínio com as dimensões de atravancamento próximas das dimensões máximas do dispositivo de fixação para facilitar a sua posterior maquinagem. O corte do bloco de alumínio foi feito com o serrote KASTO disponível no departamento e representado na Figura 44.



*Figura 44 – Corte do bloco de alumínio com um serrote KASTO*

Após o corte do bloco de alumínio, fez-se a maquinagem do dispositivo no centro de maquinagem CNC seguido da montagem do dispositivo de fixação. É de extrema importância que este dispositivo garanta o encosto máximo dos topos das amostras bem como que as amostras estejam perfeitamente alinhadas e niveladas. A Figura 45 mostra que este dispositivo

é capaz de garantir um correto posicionamento das amostras, garantindo assim que todas as amostras sejam soldadas nas mesmas condições.

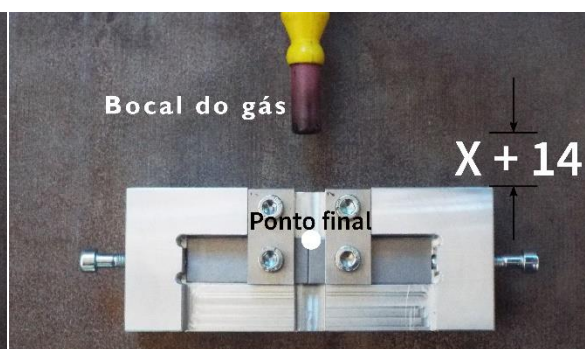


*Figura 45 – Dispositivo de fixação com correto alinhamento das amostras*

Apesar da eficácia do dispositivo no posicionamento das amostras, aquando da realização de alguns testes de soldadura, rapidamente se apercebeu que o mesmo não cumpria com um requisito extremamente importante. O dispositivo não garantia que todas as amostras fossem igualmente protegidas pelo gás inerte que protege a soldadura. A explicação para este fenómeno pode ser acompanhada pela visualização da Figura 46 e Figura 47.



*Figura 46 - Bocal do gás na posição inicial*



*Figura 47 – Bocal do gás na posição final*

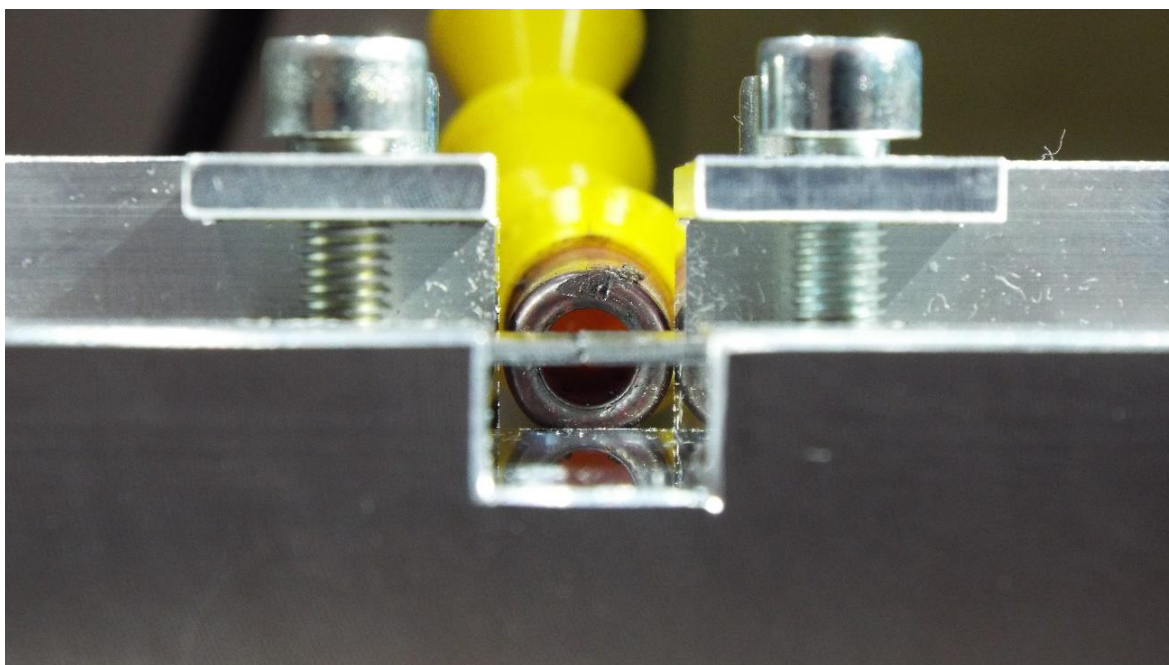
Quando se começa a soldar as duas amostras, o bocal que liberta o gás de proteção da soldadura encontra-se a uma distância mínima ( $X$ ) do dispositivo de fixação (Figura 46). No entanto, uma vez que o bocal se desloca solidariamente com os eixos da máquina, quando termina a soldadura das amostras, o eixo da máquina percorreu uma distância igual à largura das amostras (14 mm), o que significa que o bocal se afastou do dispositivo de fixação a mesma distância, não garantindo as mesmas condições de soldadura no início e no fim da mesma (Figura 47).



A proteção da soldadura é importante pois o gás é usado para prevenir a rápida oxidação da zona soldada. Apesar de as propriedades mecânicas e a resistência da soldadura não serem normalmente afetadas pela ausência de gás, as soldaduras feitas com gás são esteticamente melhores. Ao mesmo tempo o gás pode ser usado para arrefecer a peça e assim minimizar a zona termicamente afetada [22].

Mais ainda, uma vez que o movimento dos eixos da máquina provoca oscilações no bocal do gás, não se consegue garantir que a soldadura seja protegida sempre de igual e melhor forma.

O bocal deveria estar sempre posicionado de forma a que as amostras vissem a sua superfície superior e inferior protegidas pelo gás, como ilustra a Figura 48.



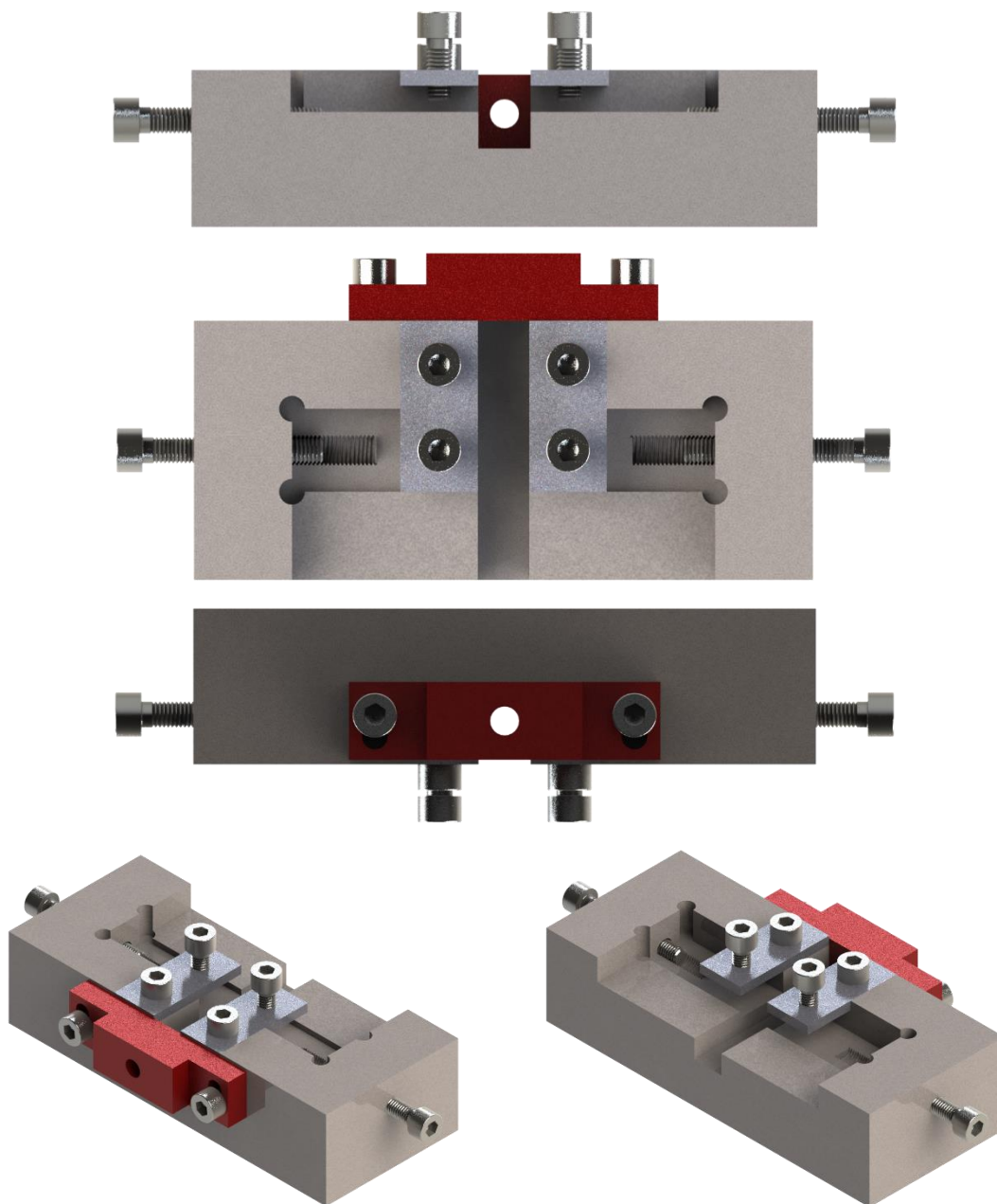
*Figura 48 - Dispositivo de fixação (versão 1) com bocal de gás*

Uma vez que desta forma não se consegue controlar a correta proteção da soldadura nem se consegue também garantir que as amostras sejam todas soldadas nas mesmas condições, deve-se corrigir este precalço para que todas as amostras sejam soldadas nas mesmas condições e, assim, os resultados possam ser o mais precisos e exatos possíveis.

Com vista a resolver este problema, construiu-se um adaptador para o dispositivo de fixação. Este adaptador tem como principal objetivo garantir com que o gás seja sempre expelido nas mesmas condições para todos e quaisquer testes de soldadura.

O adaptador está representado na Figura 49.

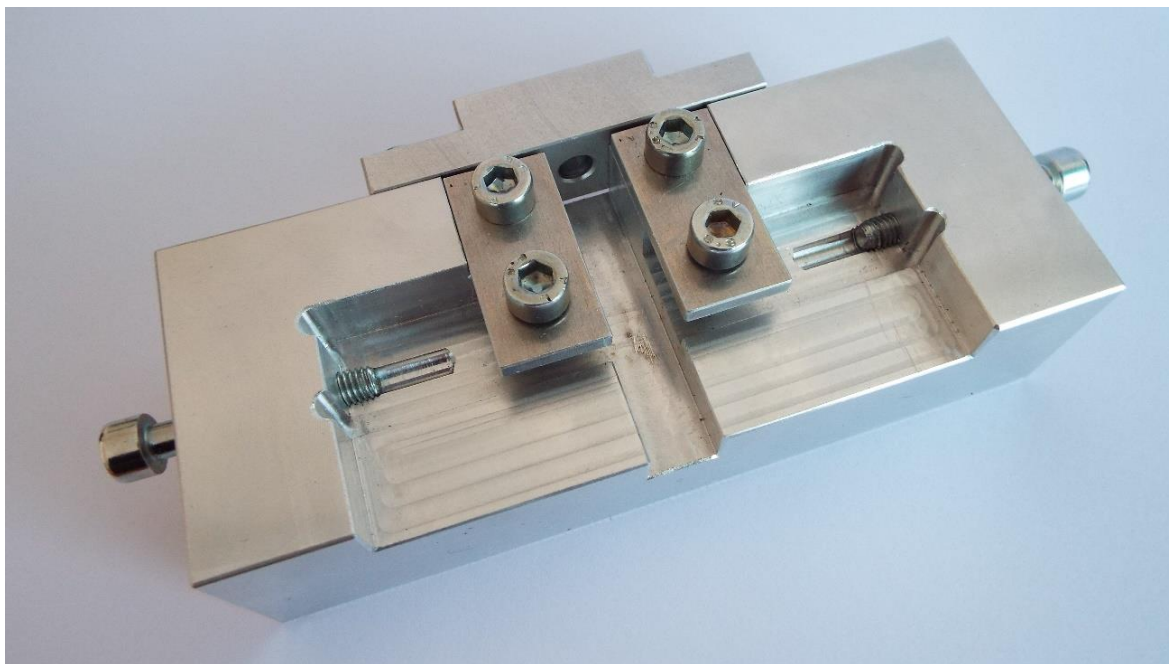




*Figura 49 – Protótipo do dispositivo de fixação com adaptação para sistema de gás (versão 2)*

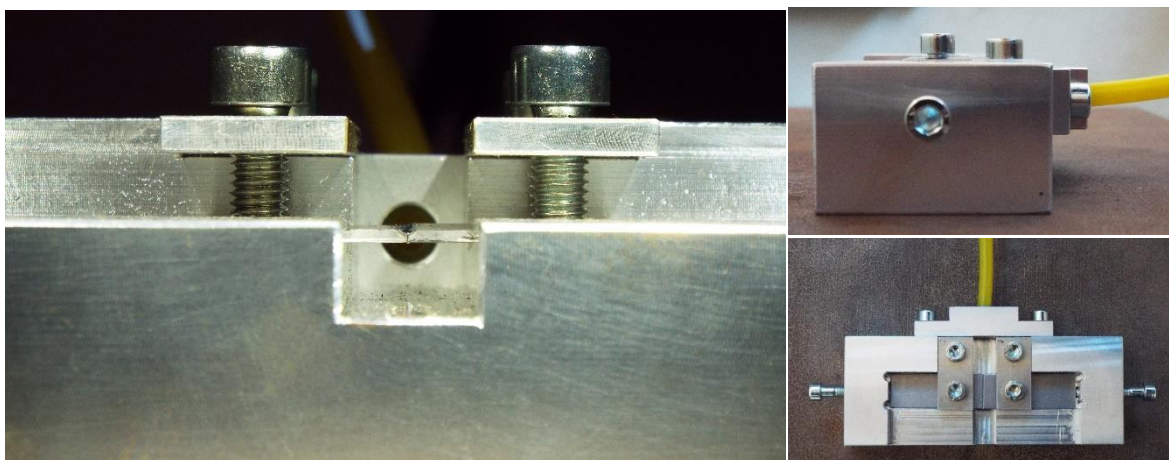
Este adaptador, representado a vermelho na Figura 49, possui um orifício para alojar o tubo de plástico flexível que transporta o gás. Este furo possui um diâmetro com duas décimas de milímetro inferior ao diâmetro do tubo para que este se mantenha no furo unicamente devido à tolerância apertada entre o tubo e o furo. O adaptador tem também uma correição no local onde é fixado pelos parafusos ao dispositivo de fixação para que a posição do adaptador possa ser alterada de forma a garantir as melhores condições de proteção da soldadura.

O adaptador depois de maquinado foi montado no dispositivo de fixação, como representado na Figura 50.



*Figura 50 - Dispositivo de fixação com adaptação para sistema de gás (versão 2)*

Devido à possibilidade de ajuste em altura do adaptador, facilmente se consegue ter o orifício que liberta o gás situado na posição que se pretende, como mostra a Figura 51.



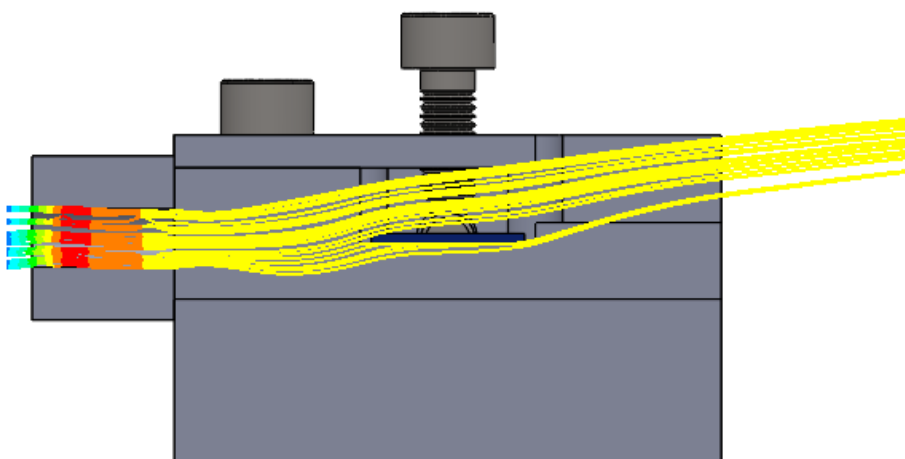
*Figura 51 - Dispositivo de fixação com bocal de gás incorporado (versão 2)*

Uma vez que se usa um tubo flexível para transportar o gás até ao dispositivo de fixação, e que este tem a sua extremidade fixa no dispositivo de fixação, consegue-se assim garantir que o gás chegue sempre de igual forma para todas as amostras. A Figura 51 mostra também o dispositivo de fixação com a adaptação para gás incorporado juntamente com o tubo do gás.

Porém, apesar de aparentemente reunidas todas as condições para soldar com eficácia as amostras que se pretendem estudar, após a soldadura de algumas amostras notou-se que o gás

não estava a proteger todo o cordão de soldadura, ou seja, o gás expelido pelo tubo através da adaptação concebida não consegue proteger a soldadura, ao contrário daquilo que se pensava.

Para perceber o que leva o gás a não proteger a soldadura, fez-se uma simulação numérica no *SolidWorks Flow Simulation*. Com esta simulação é possível ter uma ideia aproximada da trajetória do gás. O resultado pode ser visualizado na Figura 52.

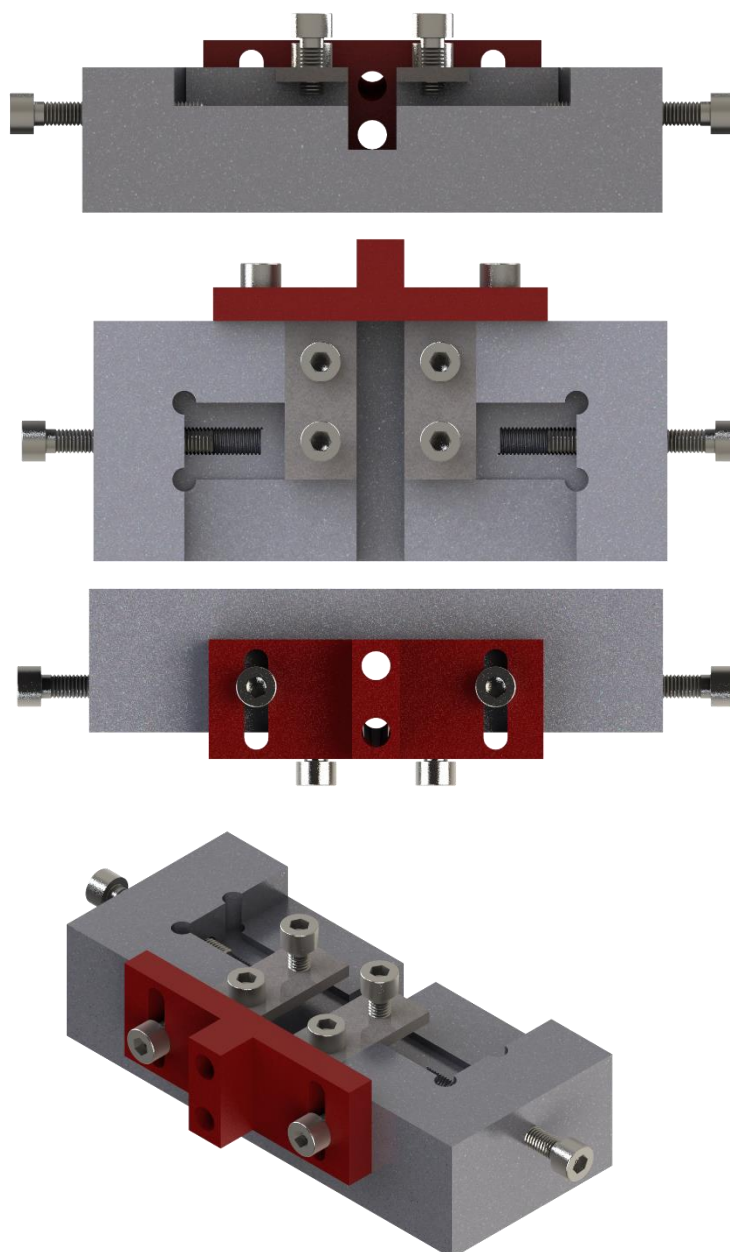


*Figura 52 - Simulação da trajetória do gás do primeiro adaptador*

Com esta simulação é visível que a camada superficial da amostra não é totalmente protegida pelo gás.

Uma vez que uma boa proteção da soldadura é imprescindível para se alcançar um bom cordão de soldadura, decidiu-se otimizar este dispositivo de forma a o gás proteger toda a amostra a soldar.

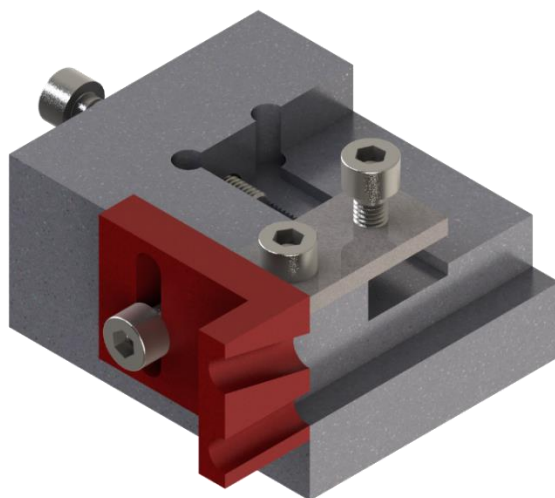
Para resolver este problema, redesenhou-se um novo adaptador para o gás que pode ser visualizado na Figura 53.



*Figura 53 – Protótipo do dispositivo de fixação com adaptação para sistema de gás (versão 3)*

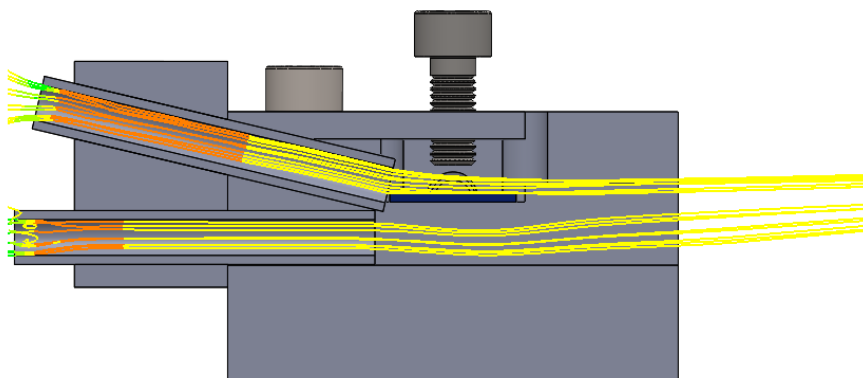
Este novo adaptador, à semelhança do anterior, é acoplado ao dispositivo de fixação através de dois parafusos que permitem ajustar a posição do adaptador. Porém, nesta versão, o adaptador possui dois furos para canalizar o gás. A Figura 54 mostra a vista em corte do dispositivo de fixação onde é possível visualizar os dois furos do adaptador responsáveis pela canalização do gás.

O furo inclinado visa proteger a soldadura da parte superior das amostras e o furo normal ao dispositivo de fixação pretende proteger a soldadura da parte inferior das amostras.



*Figura 54 – Furos responsáveis pela canalização do gás*

Antes de maquinar este componente, foi feita uma simulação com o intuito de estudar previamente o comportamento da trajetória do gás. A Figura 55 mostra o resultado da simulação.



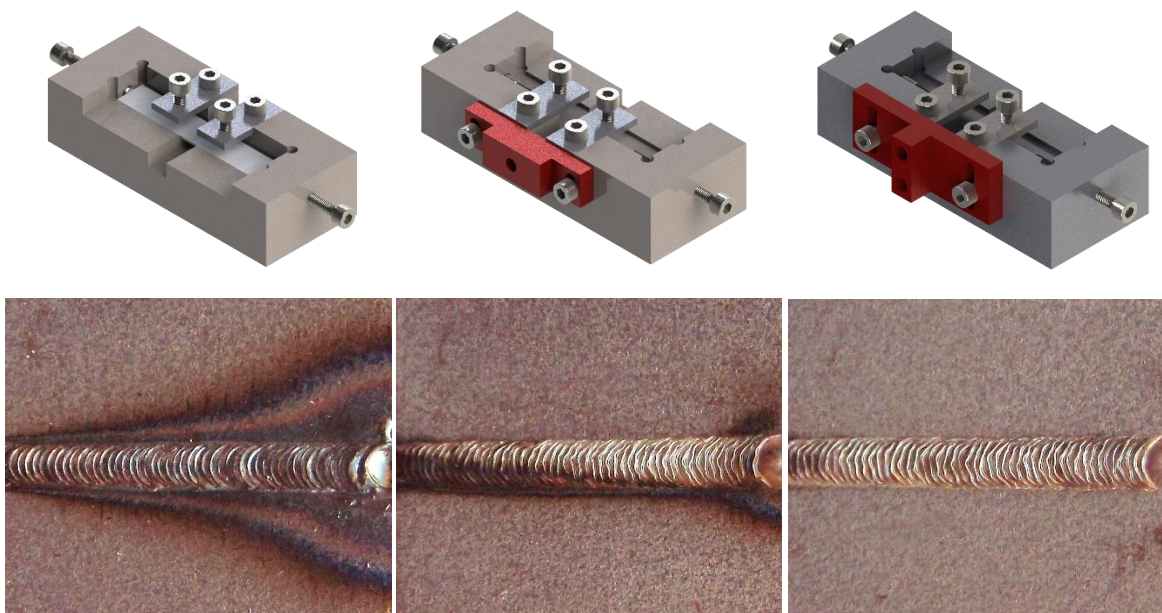
*Figura 55 – Simulação da trajetória do gás do segundo adaptador*

Através da simulação consegue-se concluir que a inclinação do furo superior mostra-se eficaz na proteção de toda a superfície superior da amostra a soldar. Esta simulação deixa bem claro que esta configuração é suficientemente boa para o gás proteger todo o cordão de soldadura superior. Por outro lado, a existência do furo inferior pouco parece proteger a parte inferior da amostra. Contudo, sendo a parte superior a mais importante, este adaptador mostra-se capaz de conferir boas condições de soldabilidade.



Para comparar a eficácia e evolução das adaptações elaboradas no dispositivo de fixação, soldaram-se três amostras com exatamente os mesmos parâmetros de soldadura cada uma em cada dispositivo de fixação.

A Figura 56, Figura 57 e Figura 58 mostra, respetivamente, a soldadura das amostras com o primeiro, segundo e terceiro dispositivo de fixação.



*Figura 56 – Amostra soldada com o primeiro dispositivo de fixação*

*Figura 57 – Amostra soldada com o segundo dispositivo de fixação*

*Figura 58 – Amostra soldada com o terceiro dispositivo de fixação*

É com clareza que se pode afirmar que existe uma evolução positiva e considerável na qualidade visual da soldadura das três amostras.

### 3.1.3. Estação de trabalho

A máquina de soldadura laser, disponível no departamento e utilizada nesta investigação, foi uma SISMA SWA300, representada na Figura 59.



Figura 59 - Máquina de soldar SISMA SWA300 [46]

A SISMA SWA300 foi concebida para fazer soldaduras de manutenção e reparação de moldes com ou sem metal de adição. Esta máquina foi também projetada para trabalhar muitas horas seguidas sem que a mesma perca a precisão e qualidade pretendidas. Os parâmetros de soldadura podem ser facilmente alterados através do intuitivo ecrã tátil que acompanha a máquina [46].

A máquina possui as seguintes principais características, detalhadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características da máquina de soldadura laser SISMA SWA300

Tipo de laser	Nd:YAG (lâmpada <i>flash</i> )
Comprimento de onda	1064 nm
Potência média do laser (máx.)	300 W
Potência de pico do laser (máx.)	12 kW
Energia de pulso do laser (máx.)	100 J

Duração do pulso laser	0.2 ms – 25 ms
Frequência de disparo	0 Hz – 200 Hz
Diâmetro do ponto (com fibra de 800 µm)	0.6 mm – 2 mm
Dimensões da máquina	1200 × 1950 × 1610 mm
Peso	310 kg
Nível de ruído (máx.)	55 db
Tensão de alimentação (laser)	400 VAC – 3 fases
Curso do eixo X	150 mm
Curso do eixo Y	150 mm
Curso do eixo Z	500 mm
Rotação do braço de soldadura	90°
Controlo manual dos eixos	Sim
Controlo assistido dos eixos	Modo semi-automático

Os componentes principais que constituem esta máquina estão enumerados na Figura 60.

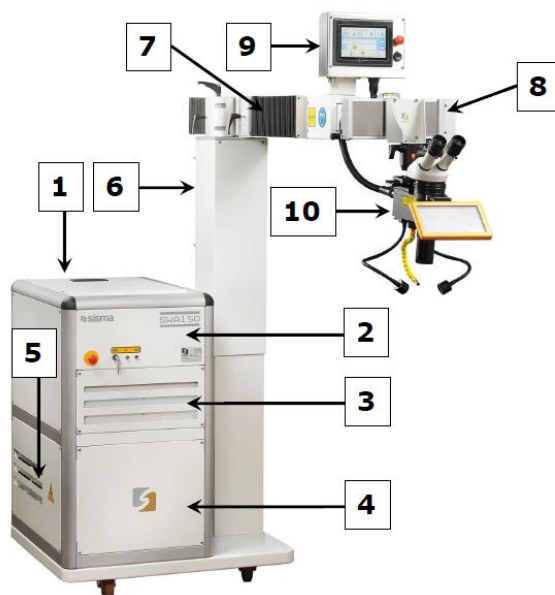


Figura 60 - SISMA SWA300 componentes [47]

- Quadro do sistema eletrónico (item 1 da Figura 60) contém a fonte laser (item 2 da Figura 60), o alimentador do laser (item 3 da Figura 60), o sistema eletrónico de controlo dos eixos (item 4 da Figura 60) e o sistema de refrigeração do laser (item 5 da Figura 60);
- Eixo Z (item 6 da Figura 60);
- Eixo Y (item 7 da Figura 60);
- Eixo X (item 8 da Figura 60);
- Ecrã tátil a cores (item 9 da Figura 60);
- Cabeça de soldadura (item 10 da Figura 60);



Com o *joystick* é possível controlar os eixos da máquina (Figura 61). Eis como o *joystick* o permite fazer:

- Mover os eixos horizontais X e Y movendo o *joystick* para baixo, cima, esquerda e direita [47];
- Mover o eixo vertical Z girando o botão do *joystick* no sentido horário ou anti-horário [47];
- Na parte superior da alavanca do *joystick* há um botão que permite ativar a emissão do laser, se oportunamente habilitado [47].



Figura 61 - Eixos da máquina SISMA SWA300 [47]

A janela principal de trabalho tem a aparência da Figura 62. Esta janela está dividida da seguinte forma:

- Configuração dos parâmetros laser (número 1 da Figura 62) [47];
- Funcionalidades operacionais (número 2 da Figura 62) [47];
- Indicação de energia e de potência média (número 3 da Figura 62) [47];
- Outras funções: gerenciamento de programas memorizados, seleção do tipo de pulso laser, alarmes em vigor, retorno ao menu principal, ativação do laser, ligação da lâmpada (número 4 da Figura 62) [47].



Figura 62 – Ecrã tátil [47]

As configurações dos parâmetros de soldadura podem ser detalhadas do seguinte modo:

- Potência do pico do pulso laser expressa em valores percentuais (número 1 da Figura 63) [47] – Valor mínimo 1% - valor máximo: 99%;
- Duração do pulso laser em milissegundos (número 2 da Figura 63) [47];
- Frequência/Sobreposição dos pontos de soldadura em Hz/percentagem (número 3 da Figura 63) [47];
- Diâmetro do ponto do laser em mm (número 4 da Figura 63) [47];
- Tipo de pulso laser (este parâmetro não está reconhecido no manual da máquina como sendo um parâmetro de soldadura mas considerou-se como tal pois tem influência na soldadura) (número 5 da Figura 63) [47].

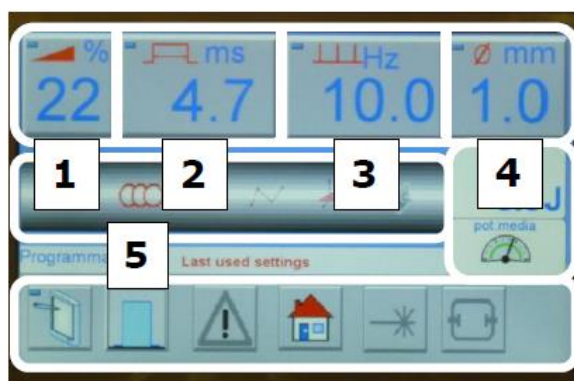









Figura 63 – Parâmetros laser reguláveis

Pressionando o ícone 5 da Figura 63, podem-se escolher os diversos tipos de pulso disponíveis e descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Tipo de pulso disponíveis [47]

Tipo de pulso	Descrição
	Modo de pulso simples retangular.
	Modo de pulso modular com três secções.
	Modo de rampa em subida: ao pulso simples retangular adiciona-se uma rampa inicial.
	Modo de rampa em descida: ao pulso simples retangular adiciona-se uma rampa final.
	Modo de rampa em subida e em descida: ao pulso simples adicionam-se uma rampa inicial e uma rampa final.
	A emissão do laser compreende 3 pulsos iguais consecutivos com intervalos de 1 ms.
	Modo simples de pulso com escala expandida: pulso simples com potência dividida para haver mais resolução a baixas potências.

A Figura 64 mostra o espaço de trabalho.



Figura 64 - Espaço de trabalho: (a) Conjunto, (b) Viseira de proteção, (c) Controlo dos eixos, (d) Bocal do gás

### 3.2. 2ª Parte - Estudo dos parâmetros de soldadura

A presente investigação tem como objetivo estudar a influência dos seguintes parâmetros de soldadura laser:

- Influência da potência do feixe laser;
- Influência da duração do pulso do feixe laser;
- Influência da sobreposição dos pontos de soldadura;
- Influência do diâmetro do feixe laser;
- Influência do tipo de pulso utilizado pelo feixe laser;
- Influência da energia empregue na soldadura;
- Influência da velocidade de soldadura.

Com o intuito de se estudar a influência de todas as variáveis acima mencionadas, fez-se um estudo individual de cada parâmetro. Por outras palavras, para o estudo de cada parâmetro variou-se apenas o valor da variável em estudo mantendo todas as restantes constantes.

As seguintes variáveis:

- Distância do laser ao material a soldar;
- Caudal do gás;
- Anisotropia das amostras.

Foram mantidas constantes ao longo de todos os testes.

As tabelas que se seguem resumem os testes elaborados e estão ordenadas da seguinte forma:

- Tabela 11 – Influência da potência do feixe laser;
- Tabela 12 – Influência da duração do pulso do feixe laser;
- Tabela 13 – Influência da sobreposição dos pontos de soldadura;
- Tabela 14 – Influência do diâmetro do feixe laser;
- Tabela 15 – Influência do tipo de pulso do feixe laser;
- Tabela 16 – Influência da energia do feixe laser;
- Tabela 17 – Influência da velocidade de soldadura;

Cada amostra foi repetida três vezes para que se conseguisse resultados mais precisos.

Tabela 11 – Influência da potência do feixe laser

Grupo A <sup>1</sup>	Avaliação do efeito da potência										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
	A1	1	12,5	50	1,3	simples retangular	8,2	1,4	10	105	10
	A2	20					24,0		6,3		
	A3	40					43,5		3,5		
	A4	60					66,1		2,2		
	A5	80					91,6		1,6		
	A6	86					100,0		1,4		

Tabela 12 – Influência da duração do pulso do feixe laser

Grupo B <sup>2</sup>	Avaliação do efeito da duração de pulso										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
	B1	50	0,3	50	1,3	simples retangular	1,3	1,4	10	105	10
	B2		3				13,0		10		
	B3		6				26,1		5,8		
	B4		9				39,1		3,9		
	B5		12				52,2		2,9		
	B6		15				65,2		2,3		
	B7		18				78,3		1,9		
	B8		21				91,3		1,6		
	B9		23				100,0		1,4		

<sup>1</sup> No grupo A, o único parâmetro variável é a potência do feixe. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.

<sup>2</sup> No grupo B, o único parâmetro variável é a duração do pulso. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.

Tabela 13 – Influência da sobreposição dos pontos de soldadura

Grupo C³	Avaliação do efeito da sobreposição										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
	C1	50	12,5	0	1,3	simples retangular	54,3	0,2	5,5	105	10
	C2			20					4,4		
	C3			40					3,3		
	C4			60					2,2		
	C5			80					1,1		
	C6			95					0,2		








Tabela 14 – Influência do diâmetro do feixe laser

	Avaliação do efeito do diâmetro										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
Grupo D <sup>4</sup>	D1	50	12,5	50	0,6	simples retangular	54,3	1,2	1,2	105	10
	D2				0,8				1,7		
	D3				1				2,1		
	D4				1,2				2,5		
	D5				1,4				3,0		
	D6				1,6				3,4		
	D7				1,8				3,8		
	D8				2				4,3		

<sup>3</sup> No grupo C, o único parâmetro variável é a sobreposição dos pontos. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.

<sup>4</sup> No grupo D, o único parâmetro variável é o diâmetro do feixe. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.

Tabela 15 – Influência do tipo de pulso do feixe laser

	Avaliação do efeito do tipo de pulso										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
Grupo E <sup>5</sup>	E1	50	12,5	50	1,3		54,3	2,6	2,7	105	10
	E2						54,5		2,7		
	E3						59,0		2,6		
	E4						59,0		2,6		
	E5						56,9		2,6		
	E6						53,4		2,8		
	E7						28,5		5,3		

<sup>5</sup> No grupo E, o único parâmetro variável é o tipo de pulso. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.

Tabela 16 – Influência da energia do feixe laser

Grupo F <sup>6</sup>	Avaliação do efeito da energia										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
	F1	9	21,6	50	1,3	simples retangular	25	6,1	6,1	105	10
	F2	30	9,4								
	F3	48	6,0								
	F4	55	5,2								
	F5	73	3,8								

Tabela 17 – Influência da velocidade de soldadura

Grupo G <sup>7</sup>	Avaliação do efeito da velocidade										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
	G1	50	12,5	50	1,3	simples retangular	54,3	0,1	2,7	105	10
	G2							1			
	G3							1,5			
	G4							2			
	G5							2,7			

<sup>6</sup> No grupo F, são variáveis os parâmetros de potência e duração de pulso de forma a manter o valor de energia constante. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.

<sup>7</sup> No grupo G, o único parâmetro variável é a velocidade de soldadura. Os valores de energia e de velocidade máxima são resultado do valor dos parâmetros colocados na máquina.



### 3.3. 3ª Parte – Análise das amostras

#### 3.3.1. Macrografia

A análise da penetração da soldadura das amostras foi realizada por macrografia. Para tal, torna-se necessário preparar as amostras que, tendo em conta a perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica idealmente preparada, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente [48]. As diversas etapas estão descritas nos subcapítulos que se seguem.

##### 3.3.1.1. Corte das amostras

Com o efeito de analisar a penetração da soldadura, fez-se o seccionamento das amostras através de um corte transversal nas mesmas que permitirá verificar a profundidade da soldadura. O método de corte que mais se adapta aos ensaios metalográficos é o corte por abrasão lubrificado tendo-se portanto utilizado a máquina de corte ilustrada na Figura 65 [48]. A Figura 66 mostra o interior da máquina de corte, exibindo o disco de corte.



Figura 65 – Máquina de corte Struers Labotom

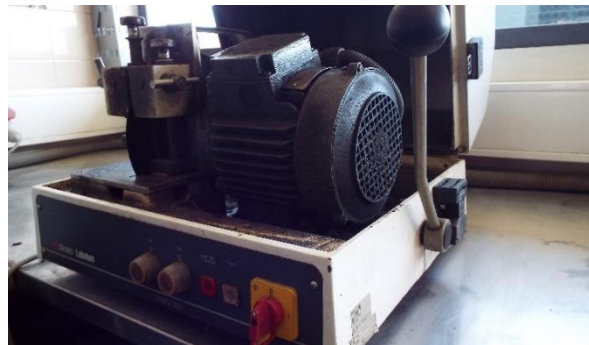


Figura 66 – Interior da máquina de corte

Com este método de corte, o líquido refrigerante lubrifica a amostra evitando danificar a mesma devido ao grande aumento de calor gerado pela fricção. Mais ainda, o líquido refrigerante ajuda a manter a zona de corte ausente de resíduos [49].

A Figura 67 exhibe a amostra antes de ser cortada e a Figura 68 ilustra a amostra depois de ser cortada.



Figura 67 – Amostra antes de ser cortada

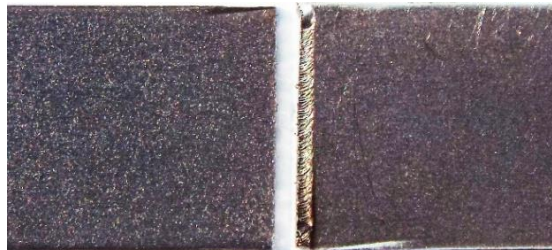


Figura 68 – Amostra depois de ser cortada

Esta etapa é bastante meticulosa pois é necessária alguma destreza para se cortar o cordão de soldadura ao longo do seu centro.

### 3.3.1.2. Polimento das amostras

Esta etapa tem como objetivo dar um acabamento superficial, polido e isento de riscos e marcas profundas, na secção que se pretende analisar. Deve-se iniciar esta operação com lixas de baixa granulometria até lixas de granulometria elevada. Dado que a granulometria é tratada em números, pode-se dizer que quanto mais baixo o número mais grossa será a lixa, ou seja, maiores serão os grãos abrasivos [48].

Para este processo foi utilizada a máquina de polimento Struers RotoPol-21, ilustrada na Figura 69. Na Figura 70 é possível ver o polimento de uma amostra.



Figura 69 - Máquina polimento Struers RotoPol-21

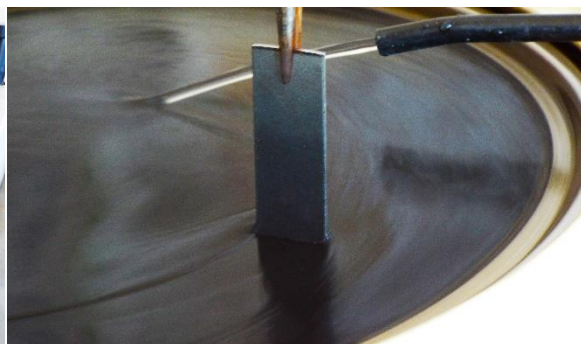


Figura 70 – Amostra a ser polida

A sequência de granulometria utilizada está representada na Tabela 18.

Tabela 18 - Sequência de granulometria utilizada

220	1200	2500	3 $\mu$ m (pasta diamante)
Mais grosseira			Mais refinada

### 3.3.1.3. Ataque químico às amostras

Esta etapa visa marcar/identificar os contornos dos grãos constituintes da amostra. Neste processo, é imersa a amostra a analisar numa solução aquosa contendo um reagente ácido por um curto período de tempo. Este irá provocar a corrosão da superfície da amostra e, uma vez que a amostra é constituída por diferentes grãos, uns vão ser mais atacados pelo ácido do que outros. Desta forma, os diversos grãos vão refletir a luz de forma diferente uns dos outros. Assim, consegue-se realçar os contornos dos grãos pois estes vão emitir diferentes tonalidades facilitando a identificação dos mesmos no microscópio [48].

Como reagente ácido utilizou-se uma solução com 5% de nital (95% de álcool etílico e 5% de ácido nítrico). A solução foi preparada numa hotte, representada na Figura 71, e obteve-se a solução ilustrada na Figura 72.



Figura 71 – Preparação da solução numa hotte



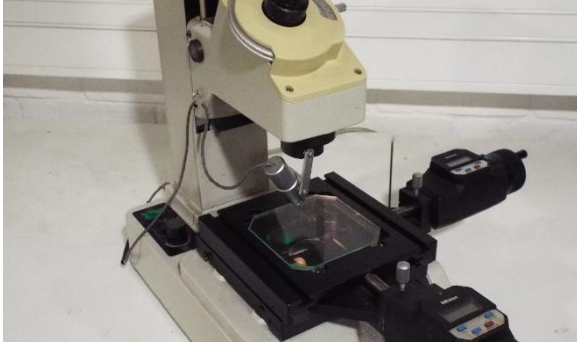
Figura 72 – Solução de nital a 5%

A solução foi preparada num recipiente de vidro e posteriormente emergiu-se cada amostra durante aproximadamente 5 segundos na solução, tempo necessário para que ocorra a revelação da microestrutura do material em análise [49].

Após concluído o ataque químico às amostras, estas foram devidamente limpas com água corrente e secas para serem analisadas ao microscópio.

### 3.3.1.4. Medição da penetração

Com o auxílio do microscópio, pretende-se medir a penetração das amostras soldadas. Para o efeito utilizou-se um microscópio de marca Mitutoyo TM, representado na Figura 73.



*Figura 73 - Microscópio Mitutoyo TM*



*Figura 74 - Câmara fotográfica Moticam*

Acoplou-se ainda uma câmara fotográfica, representada na Figura 74, para proceder ao registo das imagens das amostras estudadas.

Este procedimento (soldadura, corte das amostras, polimento das amostras, ataque químico e análise da penetração da soldadura) foi feito individualmente para cada amostra.

### **3.4. 4ª Parte – Parâmetros ótimos**

Uma vez explicado o procedimento experimental para estudar a influência dos parâmetros de soldadura na penetração de chapas de 1 mm de espessura do aço DP1000, pretende-se agora detalhar as etapas para determinar os parâmetros laser que garantem a melhor soldadura deste mesmo material.

Como é sabido, as propriedades mecânicas dos aços são afetadas principalmente por dois fatores:

- Composição química [50];
- Microestrutura [50].

O aquecimento que é provocado na peça proveniente do processo de soldadura altera a microestrutura do material. Portanto, é deveras importante regular os parâmetros laser de forma a garantir uma boa soldadura.

Como parâmetros ótimos de soldadura entende-se os parâmetros que permitam obter:

- Uma soldadura sem fissuras e com elevada resistência [4];
- O tamanho e a forma do banho de fusão adequados;
- Um ténue aumento na microdureza do banho de fusão [4];
- Uma soldadura com penetração total [4].

Para achar os parâmetros de soldadura ótimos só fará sentido analisar amostras cuja penetração é total porque amostras sem penetração total serão, à partida, munidas de propriedades inferiores quando comparadas com as amostras com penetração total.

#### **3.4.1. Parâmetros de soldadura ótimos**

Para encontrar os parâmetros de soldadura ideais na soldadura de chapas do aço DP1000, soldaram-se dez amostras. Todas estas amostras garantem penetração total. A Tabela 19 ilustra todas as amostras do Grupo X que foram realizadas com o intuito de achar os melhores parâmetros laser para soldar o aço com esta espessura.

Tabela 19 - Parâmetros ótimos de soldadura

	Parâmetros ótimos										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
Grupo X <sup>8</sup>	X1	50	12,5	80	1,1	simples retangular	54,3	0,5	1,7	105	10
	X2	45	15	80	1,1		58,6	0,4	1,6		
	X3	45	16,9	80	1,1		66,0	0,2	1,4		
	X4	45	16,9	80	1,0		66,0	0,2	1,4		
	X5	57	17,0	80	1,3		85,0	0,2	1,0		
	X6	57	17,6	80	1,3		88,0	0,2	1,0		
	X7	57	18	80	1,2		90,0	0,2	1,0		
	X8	57	9,0	60	0,6		45,0	0,3	1,2		
	X9	57	9,0	60	0,8		45,0	1,2	1,2		
	X10	53	8,0	60	0,6		37,0	1,0	1,4		

<sup>8</sup> Neste grupo as únicas variáveis que se mantêm constantes ao longo de todas as amostras são o tipo de pulso, distância focal e o caudal do gás.



### 3.4.2. Retificação das amostras

A retificação é um processo de maquinagem por abrasão que visa conferir à peça um elevado rigor dimensional e geométrico [51] que consiste em levantar a peça das peças metálicas por intermédio de cristais cortantes. Cada cristal retira uma pequena peça quando a sua aresta aguda ataca a peça, geralmente a grande velocidade [52].

Nesta etapa, pretende-se garantir uma área da secção constante e igual em todas as amostras. Por outras palavras, pretende-se garantir a mesma espessura da amostra ao longo de todo o seu comprimento.

Esta etapa é necessária uma vez que a soldadura das amostras origina um abatimento da junta soldada, ou seja, uma redução na espessura da amostra nessa zona. Em suma, o abatimento da junta provoca uma diminuição da área da secção da amostra na zona da soldadura.

O esquema da Figura 75 mostra a redução da espessura das amostras na zona soldada.



*Figura 75 – Esquema de abatimento da junta soldada*

Com o processo de retificação pretende-se conseguir uma espessura constante ao longo de toda a amostra, como está representado na Figura 76.



*Figura 76 – Esquema de amostra retificada*

Esta etapa é importante pois as amostras vão ser sujeitas a ensaios de tração e, nas condições de espessura variável da amostra, o provete tende a partir pela área de secção menor. Assim sendo, seria muito provável que as amostras partissem pelo cordão de soldadura mesmo que este estivesse em boas condições. Desta forma, os ensaios de tração poderiam levar a conclusões erróneas. Garantindo a mesma secção em todo o provete, os resultados dos ensaios de tração serão mais fidedignos e credíveis.

A retificação das amostras foi feita na máquina retificadora existente no departamento e ilustrada na Figura 77. A Figura 78 mostra a mesa magnética da máquina onde são fixadas as peças a retificar.



*Figura 77 - Retificadora KENT K6S-63SD*



*Figura 78 - Mesa magnética*

Aquando do processo de retificação das amostras notou-se que a mesa magnética da máquina retificadora não tinha capacidade suficiente para fixar as amostras. Quando a mó se sobreponha sobre as amostras e exercia força sobre as mesmas, estas eram projetadas para fora do espaço de trabalho. Para esta etapa ser elaborada em segurança e com qualidade, houve necessidade de preparar um engenho capaz de fixar as amostras à mesa da máquina retificadora.

O engenho passou por primeiramente maquinar e retificar as faces superior e inferior de uma base de aço de dimensões 100 x 185 x 20 (ver Figura 79) e posteriormente soldar as amostras a esta base (ver Figura 80). Por fim, numeraram-se as amostras (ver Figura 81) e fixou-se a base das amostras à mesa da máquina (ver Figura 82). Desta forma, consegue-se garantir uma firme fixação das amostras à mesa da retificadora e, por conseguinte, retificar as amostras nas devidas condições de segurança.

Depois de uma das faces das amostras ter sido retificada, é necessário cortar a soldadura que fixa as extremidades das amostras à base de suporte, girar todas as amostras de forma a expor a face que falta retificar e voltar a soldar as amostras. Esta é uma etapa que se por um lado é morosa e delicada devido às tolerâncias apertadas, por outro lado é uma etapa imprescindível para a execução de provetes que garantam a fiabilidade dos resultados dos ensaios de tração.



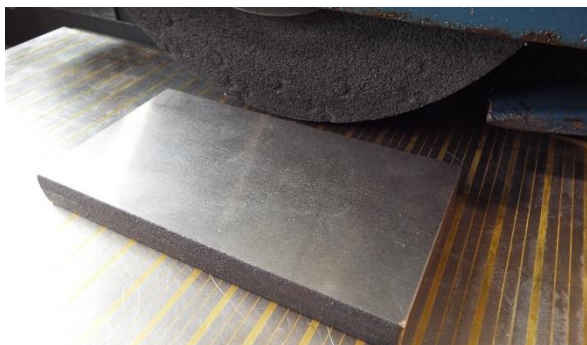


Figura 79 - Retificação da base para fixação das amostras

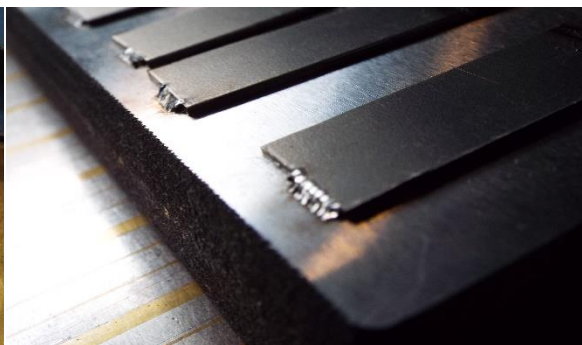


Figura 80 - Soldadura das extremidades das amostras à base fixadora



Figura 81 - Numeração das amostras

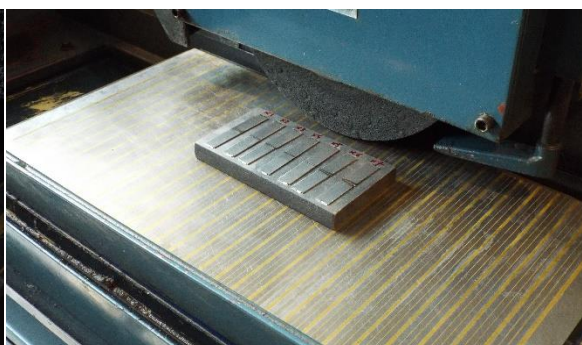


Figura 82 - Fixação das amostras à mesa da magnética da máquina retificadora

A Figura 83 mostra o processo de retificação das amostras e a Figura 84 apresenta o resultado deste mesmo processo.



Figura 83 - Retificação das amostras



Figura 84 - Amostras retificadas

Nesta última figura é possível notar que o cordão de soldadura já não é visível nas amostras.

As restantes amostras (X8, X9 e X10) foram retificadas após a conclusão das ilustradas nas imagens pois o suporte não tem espaço para mais amostras.

### 3.4.3. Maquinagem das amostras

Para averiguar qual o conjunto de parâmetros mais apropriados para soldar o aço DP1000 com 1 mm de espessura, as amostras do grupo X vão ser sujeitas a ensaios de tração para posteriormente comparar os resultados obtidos de todas as amostras e concluir quais os parâmetros que conferem melhores propriedades mecânicas a este material.

Depois de soldadas e retificadas todas as amostras do grupo X, maquinaram-se as mesmas para formar um provete que será utilizado nos ensaios de tração. As dimensões do provete cumprem com a norma ISO 6892-1:2009 [10]. A Figura 85 ilustra as dimensões do provete.

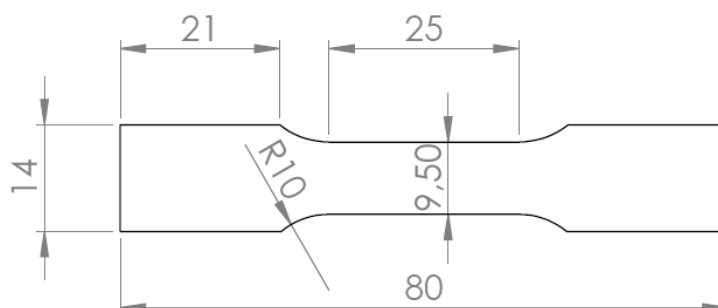


Figura 85 - Dimensões do provete segundo a norma ISO 6892-1:2009

O resultado da maquinação das amostras do grupo X deu origem aos provetes da Tabela 20.

Tabela 20 - Amostras maquinadas

Amostras do Grupo X									
X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10

Foi feita uma risca a vermelho no cordão de soldadura de cada provete antes da maquinação dos mesmos para identificar o cordão uma vez que depois de maquinados, não é possível determinar com certeza a localização do cordão.

### 3.4.4. Ensaio de tração

Nesta fase, teve como objetivo determinar as propriedades mecânicas das amostras antes e após a soldadura. Deste modo, tenciona-se comparar o comportamento destas amostras e verificar qual o impacto da soldadura laser no comportamento mecânico das mesmas.

O ensaio de tração consiste, basicamente, em tracionar um provete, por intermédio de duas maxilas estando uma fixa e a outra no travessão que se desloca. Face a este ensaio, os materiais metálicos apresentam, por norma, o comportamento apresentado na Figura 86.

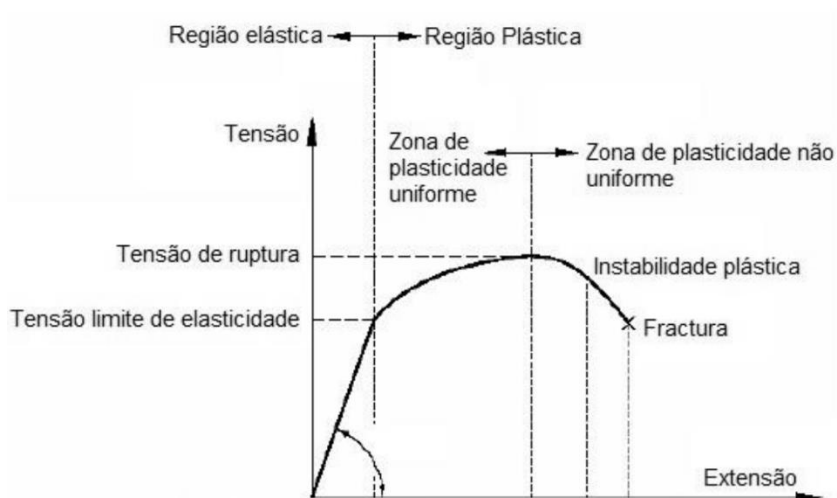


Figura 86 - Curva tensão-deformação

Para caraterizar o material aplicam-se as equações que se seguem.

Tensão nominal:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (9)$$

F – força em N

A<sub>0</sub> – área da secção inicial do provete

σ – tensão nominal

Deformação nominal:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (10)$$

ΔL – variação do comprimento do provete

L<sub>0</sub> – comprimento inicial do provete

ε – deformação nominal

Tensão real:

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (11)$$

$\sigma$  – tensão nominal

$\varepsilon$  – deformação nominal

$\sigma_{real}$  – tensão real

Deformação real:

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (12)$$

$\varepsilon$  – deformação nominal

$\varepsilon_{real}$  – deformação real

Tensão de rutura:

$$\sigma_r = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (13)$$

$F_{m\acute{a}x}$  – Força máxima

$A_0$  – área da secção inicial do provete

Os diagramas tensão-deformação, para a maioria dos materiais de engenharia, apresentam uma relação linear entre tensão e deformação na zona de elasticidade. Consequentemente, um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação. Este facto, descoberto por Robert Hooke, é conhecido como lei de Hooke. Matematicamente, tal lei é expressa por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (14)$$

$E$  – módulo de *Young*

$\varepsilon$  – deformação nominal

$\sigma$  – tensão nominal

Na expressão,  $E$  representa a constante de proporcionalidade, chamada módulo de elasticidade ou módulo de *Young* e representa o declive da reta que melhor se adequa aos pontos do diagrama tensão-deformação até ao limite de elasticidade. O módulo de *Young* é um parâmetro mecânico que indica uma medida de rigidez de um material sólido.

Para determinar a área da secção do provete é necessário medir a espessura e a largura do provete. Para isso, utilizou-se um micrómetro e um suporte de fixação (ambos da marca Mitutoyo) ilustrados na Figura 87. Na Figura 88 consegue-se observar a medição da largura de um provete.





Figura 87 – Suporte e micrómetro Mitutoyo



Figura 88 – Medição de amostra

De forma a obter valores de largura e de espessura médios, mediram-se dois pontos para a espessura (DC e DD) e para a largura (DA e DB) e posteriormente fez-se a média destes mesmos pontos. A Figura 89 ilustra as medições efetuadas.

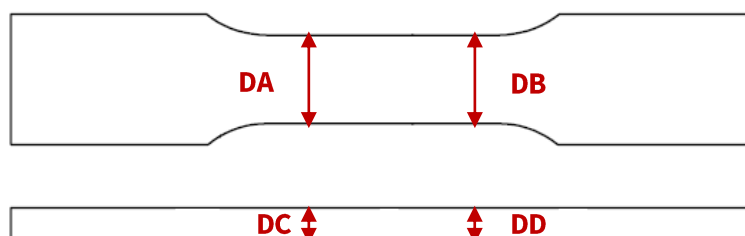


Figura 89 - Pontos de medição

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de tração Shimadzu AE 50kN e com recurso a vídeo extensómetro. A Figura 90 mostra a máquina de tração, o vídeo extensómetro e a amostra a tracionar na qual se vêem as marcas que indicam a distância extensométrica ( $L_0$  da Equação 10) e a variação do comprimento durante o ensaio ( $\Delta L$  da Equação 10).

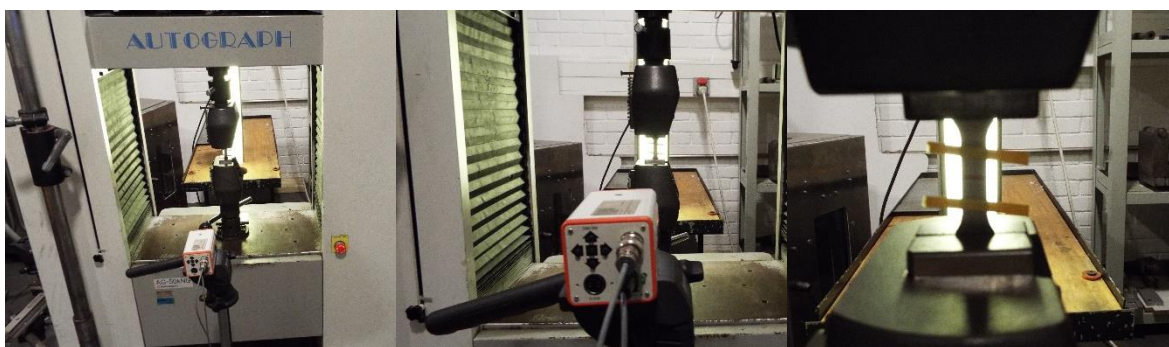


Figura 90 – Ensaios de tração com vídeo extensómetro

Os ensaios foram todos efetuados a uma velocidade de 3 mm/min e seguiram as indicações da norma ISO 6892-1:2009 [53].

### 3.4.5. Medição de microdurezas

A medição de microdurezas é um processo muito utilizado nos dias de hoje. Estes testes utilizam um indentador, geralmente de diamante, para penetrar a superfície da amostra e assim determinar a dureza da mesma com base na carga utilizada para causar a deformação na amostra e nas dimensões desta mesma deformação. Os métodos de medição de dureza mais utilizados são a dureza de *Vickers*, *Rockwel* e *Brinell* [54].

Nesta fase, procura-se avaliar a resistência mecânica da zona soldada. Depois de realizados todos os ensaios de tração a todas as amostras do grupo X, selecionou-se aquela que teve o melhor comportamento no ensaio de tração e analisou-se a sua microdureza. Analisou-se somente a amostra que teve melhor comportamento mecânico uma vez que a medição de microdurezas é um processo moroso e seria impraticável analisar todas as amostras.

As microdurezas foram medidas recorrendo a dois métodos: O método convencional de medição de microdurezas através de uma máquina de microdurezas *SHIMADZU* e através do mais recente método de medição de microdurezas através de nanoindentação com a máquina *CSM Instruments*. Posteriormente, os resultados destes dois métodos foram comparados.

A Figura 91 mostra a máquina convencional utilizada para a medição de microdurezas. A Figura 92 mostra o indentador desta mesma máquina.



Figura 91 - Shimadzu HMV-2000

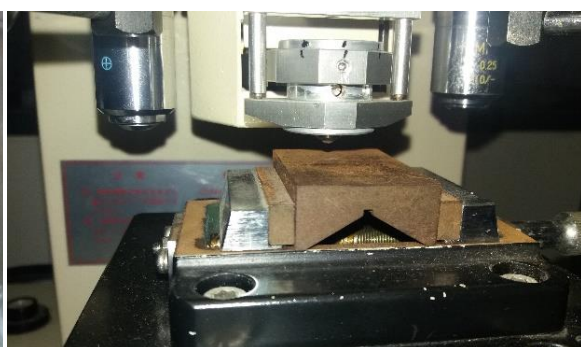


Figura 92 - Indentador

Para este método, utilizou-se a medição de microdurezas *Vickers*. Para tal, utilizou-se um indentador de diamante com um ângulo entre faces opostas de  $136^\circ$ , representado na Figura 93.

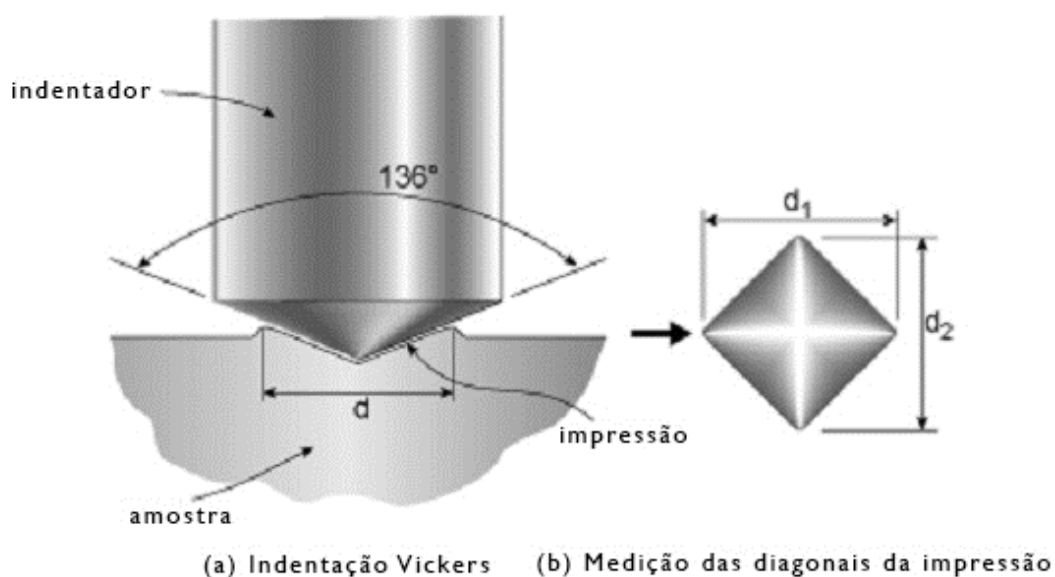


Figura 93 – Representação esquemática de um teste de microdureza Vickers [55]

A medição de microdurezas *Vickers* é determinada com base na força/carga aplicada no indentedor e pela deformação provocada na amostra pela penetração do mesmo. A microdureza *Vickers* é calculada através da equação que se segue [54]:

$$HV = 0.1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (15)$$

Onde,

HV – Microdureza *Vickers*

F – Força aplicada (N)

d – Média do comprimento das diagonais impressas na amostra.  $d = (d_1 + d_2)/2$ , Figura 93.

A medição dos comprimentos  $d_1$  e  $d_2$  é feita manualmente com recurso ao sistema de microscopia da máquina.

A medição de microdurezas por nanoindentação exige que as amostras sejam polidas até lixa de granulometria 2000 [10]. Assim, poliu-se os provetes pela seguinte ordem de granulometria: 220 – 1200 – 2000. Para esta etapa usou-se novamente a máquina de lixar/polir Struers RotoPol-21 ilustrada na Figura 69.

Para a medição de microdurezas utilizou-se a máquina de nanoindentação – *CSM Instruments Indentation*, ilustrada na Figura 94. As amostras previamente polidas foram inseridas no dispositivo de fixação da máquina para serem analisadas, como mostra a Figura 95.



Figura 94 – Máquina de nanoindentação CSM Instruments

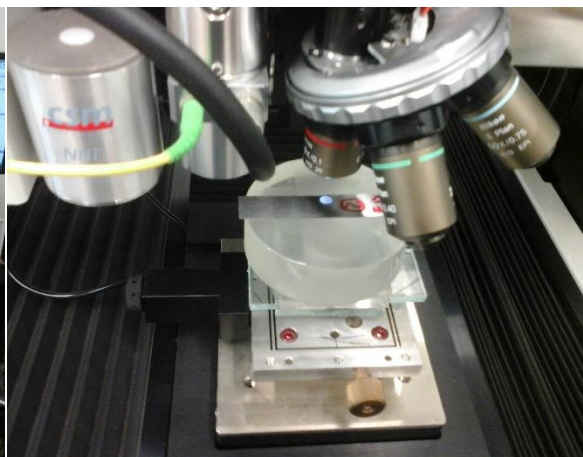


Figura 95 – Amostra a ser analisada

Uma matriz de 1×60 indentações com um espaçamento de 0,1 mm foi utilizada para analisar cada amostra. Por outras palavras, cada amostra foi analisada ao longo de uma linha de 6 mm de comprimento com um espaçamento entre indentações de 0,1 mm. A Figura 96 mostra uma representação esquemática da linha de pontos que se pretende analisar.

Os testes de nanoindentação foram realizados utilizando um indentador de diamante *Berkovich* com 20 nm de raio nominal das arestas e com uma inclinação das faces de 65,03° em relação ao eixo vertical, representado na Figura 97.

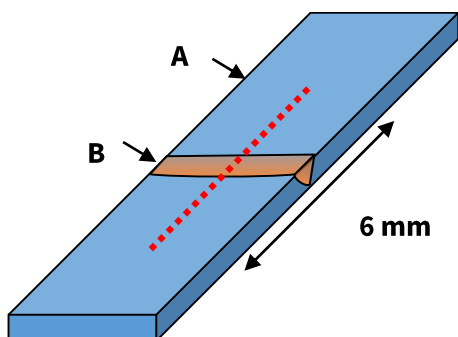


Figura 96 – Representação esquemática da medição de microdurezas ao longo da amostra

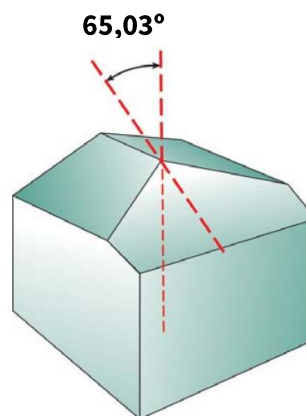
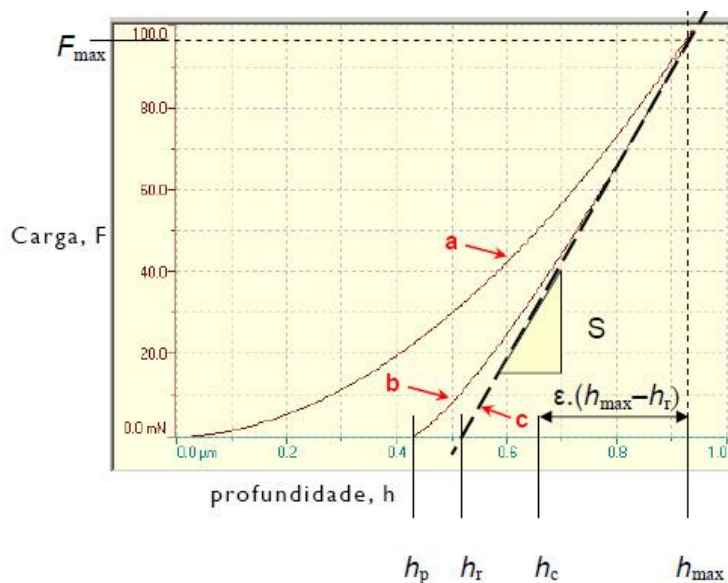


Figura 97 – Indentador Berkovich

Nos testes de nanoindentação, o indentador é pressionado contra a peça com determinada força. À medida que o indentador exerce força na peça, este vai provocando deformação elástica e plástica na peça, “carimbando” o formato do indentador na mesma. Quanto maior a força aplicada no indentador, maior a penetração provocada pelo indentador na peça. Posteriormente, o indentador é removido e apenas a deformação elástica causada no material pode ser recuperada. A Figura 98 mostra a curva típica de um teste de nanoindentação.





- |  |  |  |
|--|--|--|
| a – curva da força de penetração;                  | $h_p$ – penetração permanente provocada pela indentação na peça;               | $h_{max}$ – penetração máxima em $F_{máx}$ ; |
| b – curva da remoção da força;                     | $h_r$ – interseção da reta tangente c com o eixo das abcissas;                 | S – contato de rigidez ( $S = dF/dh$ )       |
| c – curva tangente a b na força máxima $F_{máx}$ ; | $h_c$ – profundidade do contacto com o indentador com a amostra em $F_{máx}$ ; | $\epsilon$ – constante geométrica;           |

Figura 98 – Curva típica do teste de nanoindentação [56]

A grande diferença de nanoindentação para as outras técnicas é que a análise da área não vem da imagem mas sim dos dados da indentação. A dureza é calculada totalmente automaticamente pela máquina. A Figura 99 mostra as curvas médias da aplicação da carga no material base (A) e na zona soldada (B). A Figura 100 mostra a deformação provocada pelo indentador na peça.

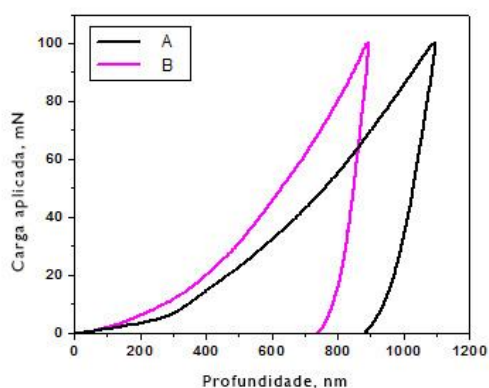


Figura 99 – Curva média da aplicação da carga no material base (A) e na zona soldada (B)

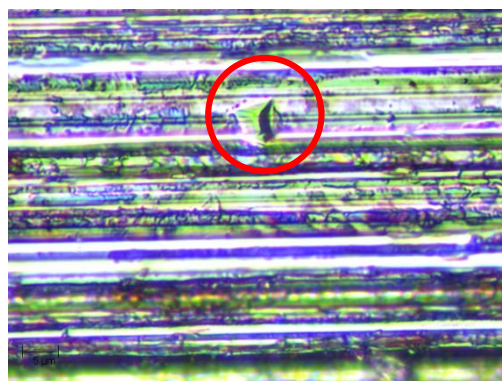


Figura 100 – Resultado de outra nanoindentação provocada na peça

### 3.4.6. Análise da microestrutura

Os metais, quando se encontram no estado sólido, possuem, por regra, uma estrutura cristalina. Esta estrutura refere-se ao arranjo, padrão e repetição dos átomos. Normalmente, os materiais metálicos possuem uma estrutura policristalina, o que significa que consistem num conjunto de cristais muito pequenos. Estes cristais são geralmente denominados de grãos. Por norma, os grãos do material são tão pequenos que só podem ser observados ao microscópio. Portanto, a microestrutura é geralmente observada usando um microscópio ótico ou eletrónico, dependendo do tamanho dos grãos [57].

A análise microestrutural pode ser usada com o intuito de determinar as falhas de componentes mecânicos de forma a determinar as causas das mesmas. A análise microestrutural pode ainda revelar se as condições de trabalho provocaram alterações na microestrutura do material [58].

A amostra que se pretende analisar não deve conter arranhões provenientes do processo de polimento nem apresentar sinais de corrosão devido ao ataque químico. A superfície da amostra que se pretende analisar deve ser plana o suficiente para permitir a observação em grande resolução [59]. Para se obter uma amostra com estas características, a preparação das amostras compreende as seguintes etapas:

- I. Seleção da amostra;
- II. Corte da secção da amostra;
- III. Embeber a amostra em resina;

Uma vez que se vai observar ao microscópio a uma escala muito reduzida, é necessário que a face a analisar esteja completamente plana porque, caso contrário, não se consegue focar tudo o que se quer ver. Dada a reduzida espessura da amostra, não se consegue manter a amostra perpendicular à lixa o que origina uma superfície não plana. Ver Tabela 21.

*Tabela 21 - Preparação de amostras para polir*

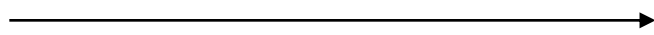
	<p>Cortou-se um anel de tubo com comprimento suficiente para ser manuseado manualmente aquando do processo de polimento.</p>
	<p>De seguida cortou-se a amostra a analisar de forma a caber dentro do anel de tubo cortado anteriormente.</p>
	<p>Colocou-se a amostra a analisar dentro do anel de tubo.</p>
	<p>Preencheu-se o espaço entre o anel e a amostra com cola de forma a fixar a amostra ao anel.</p>
	<p>Por fim, repetiu-se o mesmo procedimento para mais duas amostras. No final totalizou-se três amostras para serem analisadas.</p>

Com este procedimento consegue-se fazer o polimento da face da amostra que se pretende analisar de forma a que esta fique plana.

IV. Lixamento e polimento;

Nesta etapa utilizou-se a sequência de granulometria indicada na Tabela 22.

*Tabela 22 - Sequência de polimento*

220	1200	2500	4000	3 $\mu$ m (pasta diamante)
Mais grosseira				Mais refinada

A Figura 101 e Figura 102 mostram o resultado do polimento à face da amostra que se pretende analisar.



*Figura 101 – Lixamento da face da amostra*



*Figura 102 – Polimento da face da amostra*

V. Ataque químico;

VI. Análise com microscópio.

As amostras estão prontas para serem analisadas ao microscópio.



# 4.

## Resultados e discussão

*'I can't change the direction of the wind, but I can adjust my sails to always reach my destination.'*

Jimmy Dean

---

**Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos dos testes realizados.**

Este capítulo está dividido nas duas grandes tarefas que constituem esta investigação. A influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura e a procura dos parâmetros mais propícios para soldar o aço DP1000.

### **4.1. Influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura**

Para estudar a influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura, foram estudadas 46 amostras diferentes e cada uma destas amostras foi repetida três vezes. Analisaram-se, portanto, 138 testes. Em seguida, são expostos os resultados da média de cada amostra.

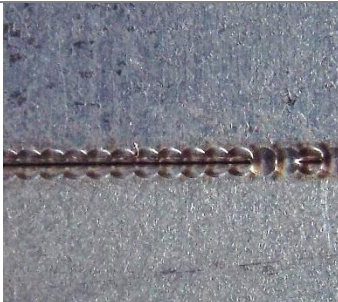
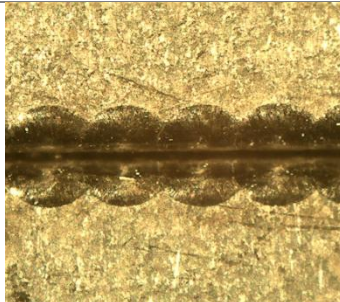
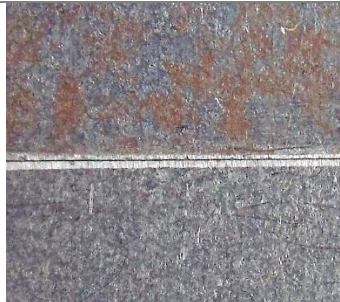
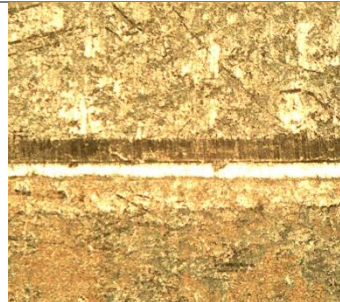
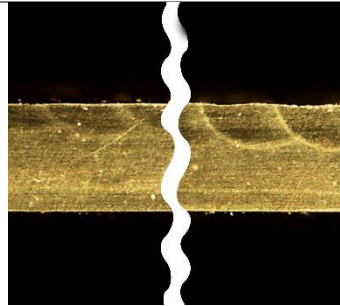
Todas as imagens das tabelas que seguem estão representadas de tal forma que a soldadura se inicia no lado esquerdo e termina no lado direito.



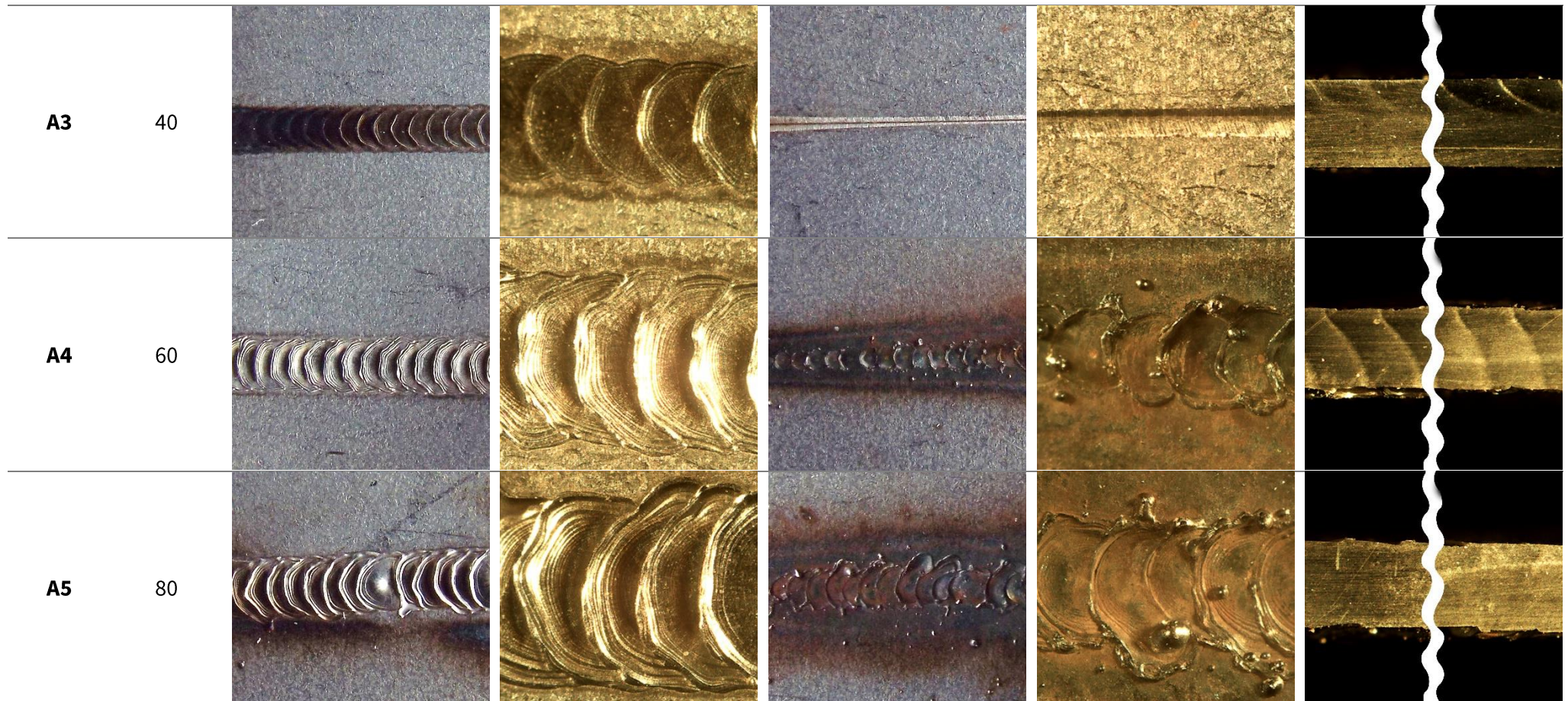
### 4.1.1. Influência da potência do feixe laser

A Tabela 23 ilustra as amostras soldadas provenientes dos testes do grupo A.

*Tabela 23 - Resultados das amostras do grupo A*

Amostra	Potência [%]	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio - zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio - zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio - zoom 15x)
<b>A1<sup>9</sup></b>	1	-	-	-	-	-
<b>A2</b>	20					

<sup>9</sup> Os parâmetros de soldadura da amostra A1 não foram suficientemente capazes de soldar a amostra.







Os resultados quantitativos destas amostras estão representados na Tabela 24 e Figura 103 .

Tabela 24 – Valores da penetração obtidos das amostras do grupo A

	Amostras	Potência [%]	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo A	A1	1	0	0
	A2	20	0,23	0,35
	A3	40	0,39	0,44
	A4	60	1	1
	A5	80	1	1
	A6	86	1	1

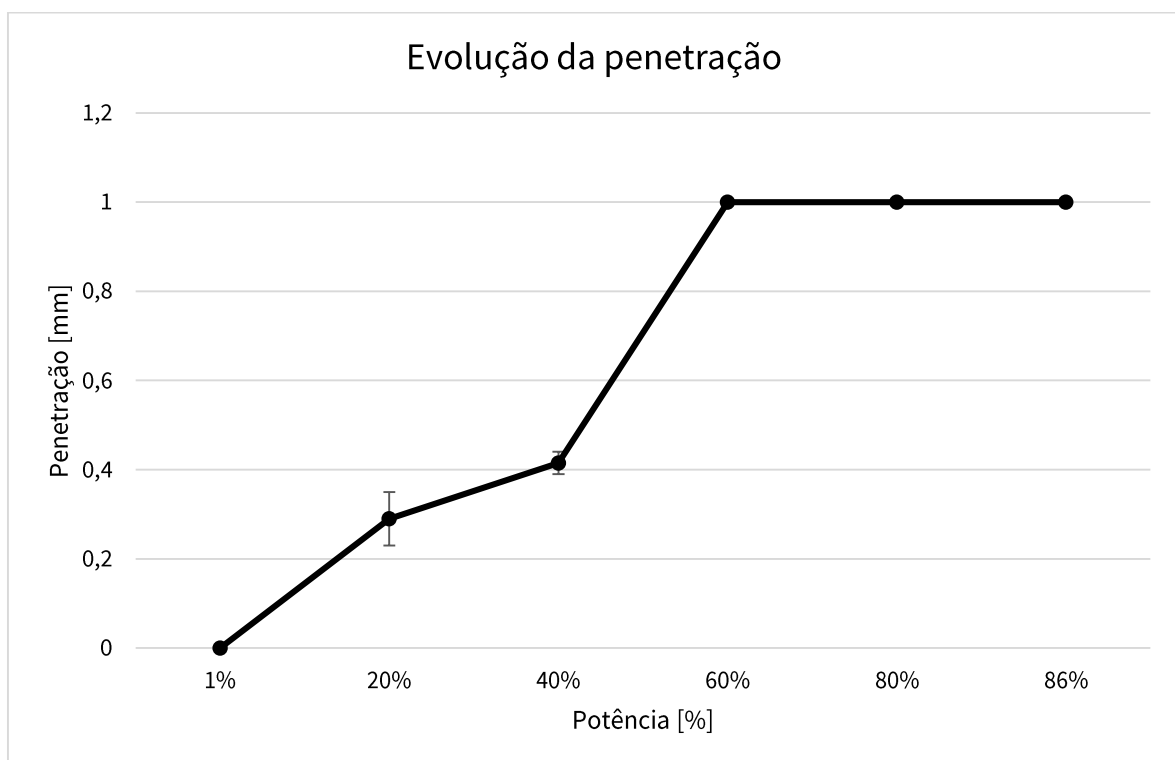


Figura 103 - Evolução da penetração das amostras do grupo A

Depois de analisados os resultados pode-se concluir que a penetração da soldadura aumenta com o aumento da potência do feixe laser. Isto permite concluir que a equação (4) também é válida para a soldadura por laser pulsado no que se refere à influência da potência na penetração da soldadura.

$$h = K \frac{P}{Dv} \quad (4)$$

A penetração é assim diretamente influenciada pela potência.

A soldadura só é constante ao longo de todo o cordão quando se obtém penetração total durante todo o cordão. Como as amostras A2 e A3 não possuem penetração total, é possível notar que a penetração não é constante ao longo do cordão de soldadura. Este facto acontece, pois, à medida que o material vai sendo soldado vai sendo também aquecido tornando o material mais “macio” facilitando o processo de soldadura permitindo maiores penetrações.

Os salpicos existentes nas amostras A4, A5 e A6 são essencialmente provocadas pelo dispositivo de fixação.

É possível notar também nestas amostras que a parte inferior da soldadura não foi protegida pelo gás.

Com estas amostras já é possível estimar que o parâmetro de potência ideal para soldar este aço se deve situar entre os 40% e os 60%.

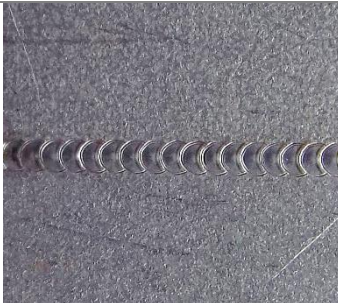
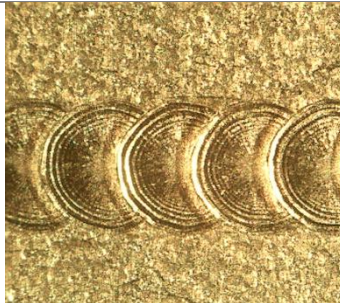

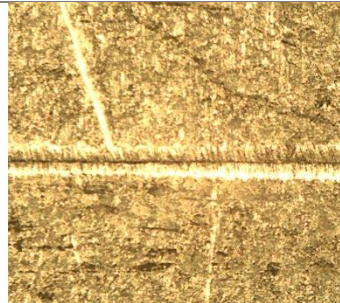
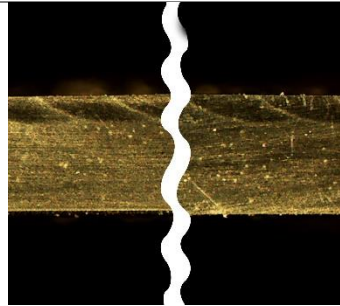
Os parâmetros usados na soldadura da amostra A1 não permitiram ligar as duas peças.

Quando maior a potência, menor a velocidade permitida para soldar. Ver Tabela 11 do capítulo 3.2.

### 4.1.2. Influência da duração do pulso do feixe laser

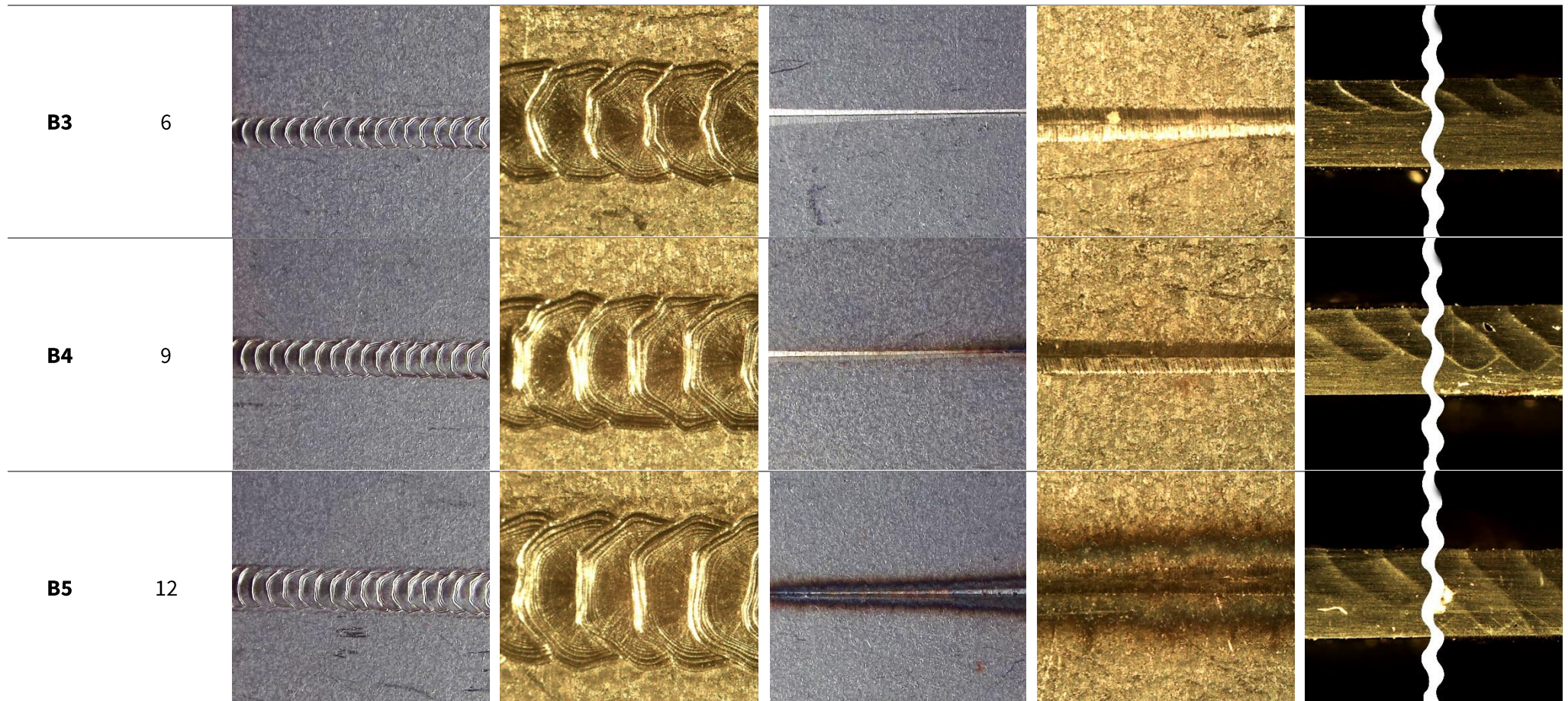
A Tabela 25 ilustra os resultados das amostras do grupo B.

Tabela 25 - Resultados das amostras do grupo B

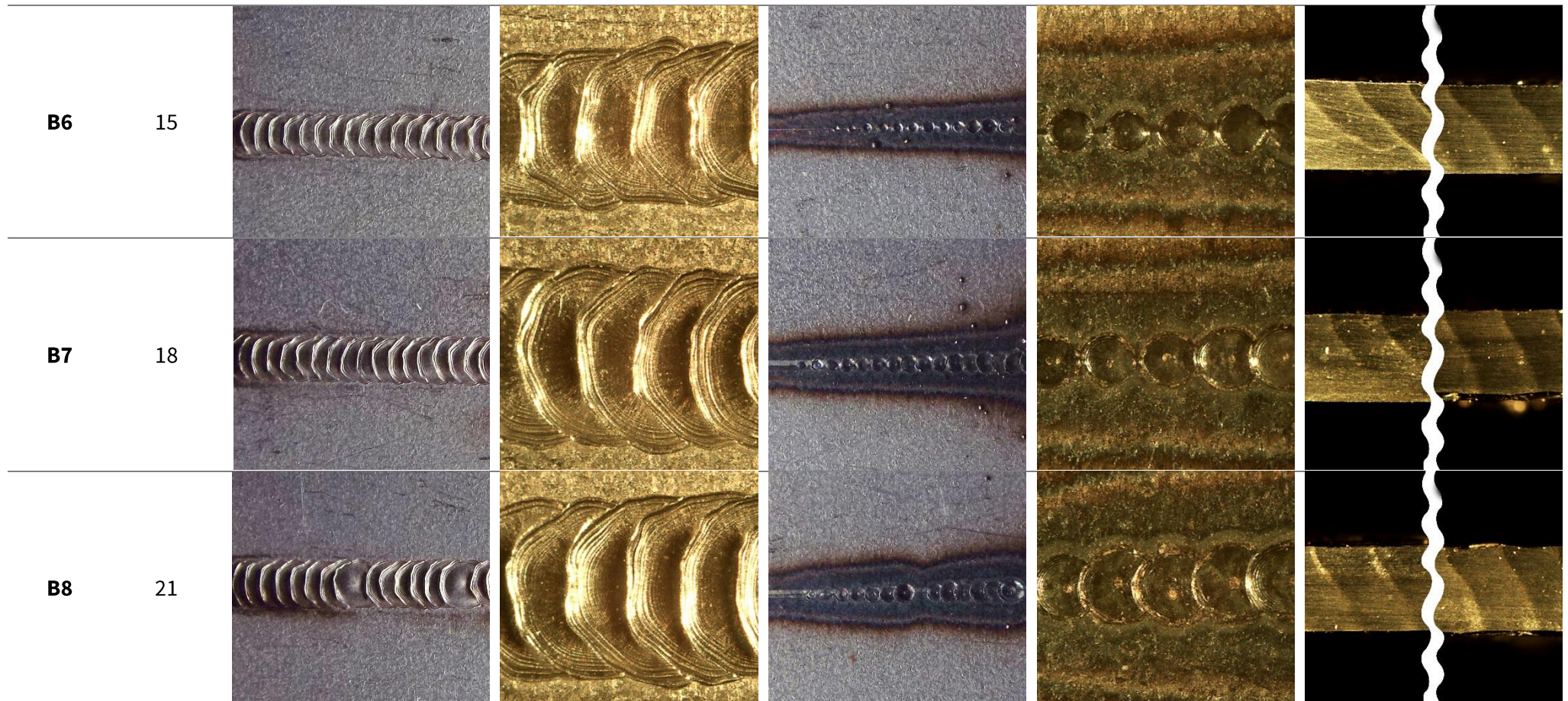
Amostra	Duração [ms]	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio - zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio - zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio - zoom 15x)
<b>B1<sup>10</sup></b>	0,3	-	-	-	-	-
<b>B2</b>	3					

<sup>10</sup> Os parâmetros de soldadura da amostra B1 não foram suficientemente capazes de soldar a amostra.









B9

23



Os resultados quantitativos estão representados na Tabela 26 e Figura 104.

Tabela 26 – Valores da penetração obtidos das amostras do grupo B

	Amostras	Duração [ms]	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo B	B1	0,3	0	0
	B2	3	0,25	0,26
	B3	6	0,35	0,45
	B4	9	0,53	0,73
	B5	12	0,55	0,91
	B6	15	0,76	1
	B7	18	0,75	1
	B8	21	1	1
	B9	23	1	1

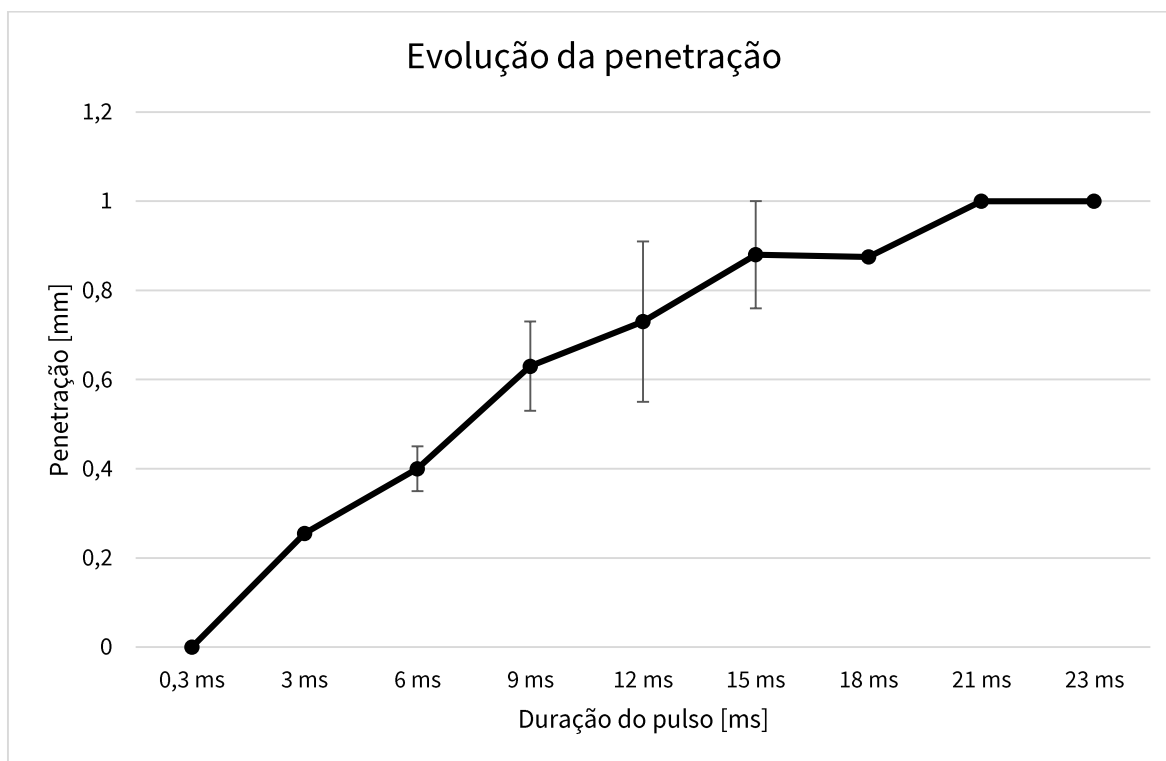


Figura 104 - Evolução da penetração das amostras do grupo B



Os resultados obtidos permitem concluir que quanto maior for a duração do pulso, maior é a penetração da soldadura.

Isto acontece pelo seguinte. A energia pode ser calculada através da Equação (16).

$$E[J] = P[W] \times t[s] \quad (16)$$

Para a mesma frequência de pulsos, tal significa que quanto maior for o tempo/duração do pulso maior será a energia que o laser fornecerá à peça. Um aumento da energia resulta num aumento da penetração. A Figura 105 mostra uma representação esquemática de duas ondas (a. e b.) com durações de pulso diferentes, na qual se observa que a energia de b. é maior que a de a. (Ver Equação 7).

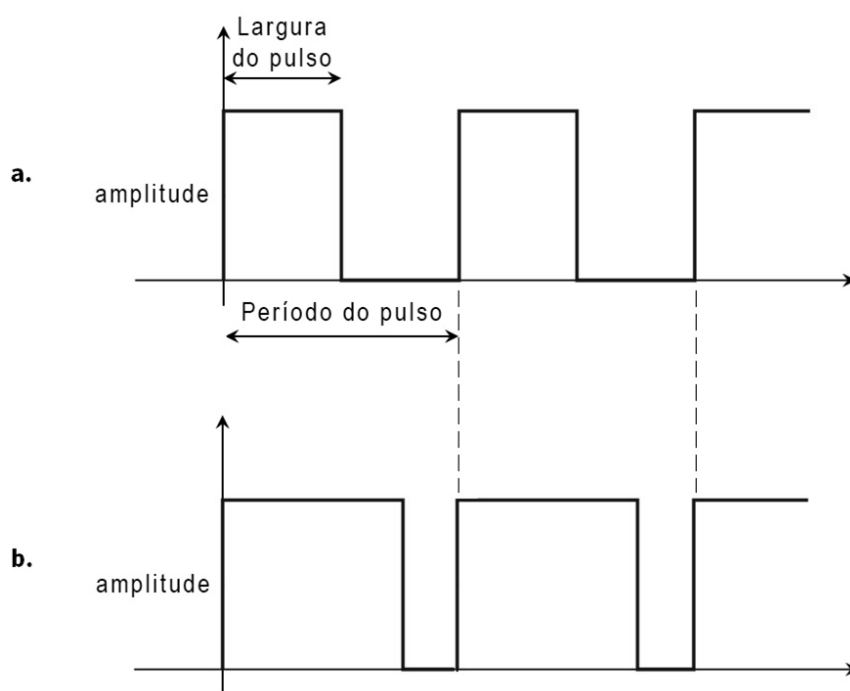


Figura 105 - Representação esquemática da duração do pulso

Contrariamente àquilo que se obteve com esta experiência, na revisão bibliográfica fez-se referência a um estudo que menciona precisamente o efeito contrário àquele aqui descrito. Ou seja, este artigo descreve que quanto maior a duração do pulso menor é a penetração. Apesar de não ser claro através da leitura do artigo, pensa-se que isto acontece pois apesar de a duração do pulso ter sido aumentada, talvez se tenha mantido a energia constante diminuindo a potência do feixe. Assim, variando a duração do pulso e mantendo a energia constante, quanto maior for

a duração do pulso, menor é a energia recebida pela peça levando a uma diminuição da penetração.

Os resultados obtidos mostram também que os parâmetros da amostra B1 não são suficientes para soldar as duas peças.


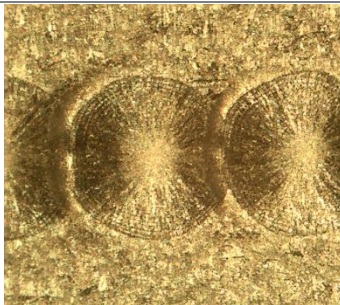
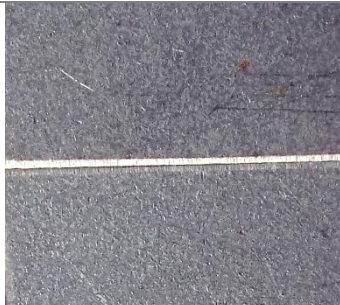
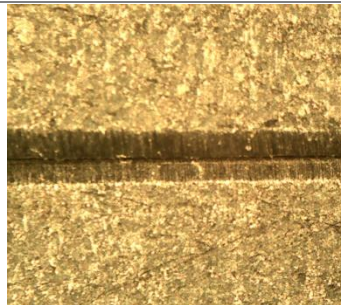
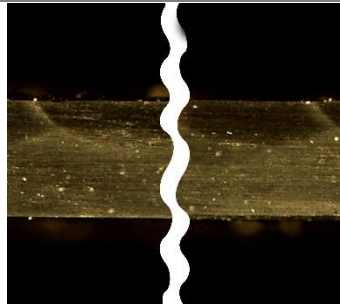



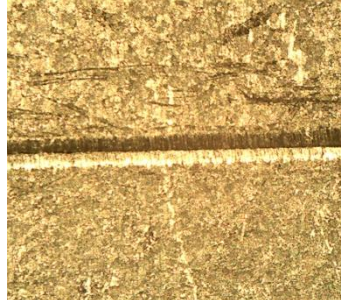
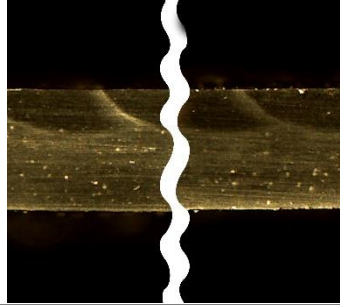
Nas amostras B8 e B9 nota-se que a sobreposição dos pulsos não é constante. Isto acontece porque a máquina não tem capacidade de fazer um cordão contínuo à velocidade pretendida. Daí se notar uma quebra no cordão. A máquina não devia permitir escolher esta velocidade para a configuração desta amostra se não consegue fazer um cordão contínuo. Por esta razão os resultados destas amostras não são completamente fiáveis, apenas dão uma indicação da tendência.

Nota-se também que há um grande declive na penetração de soldadura. Este declive tende a aumentar com o aumento da duração do pulso até que se obtém penetração total em todo o cordão.

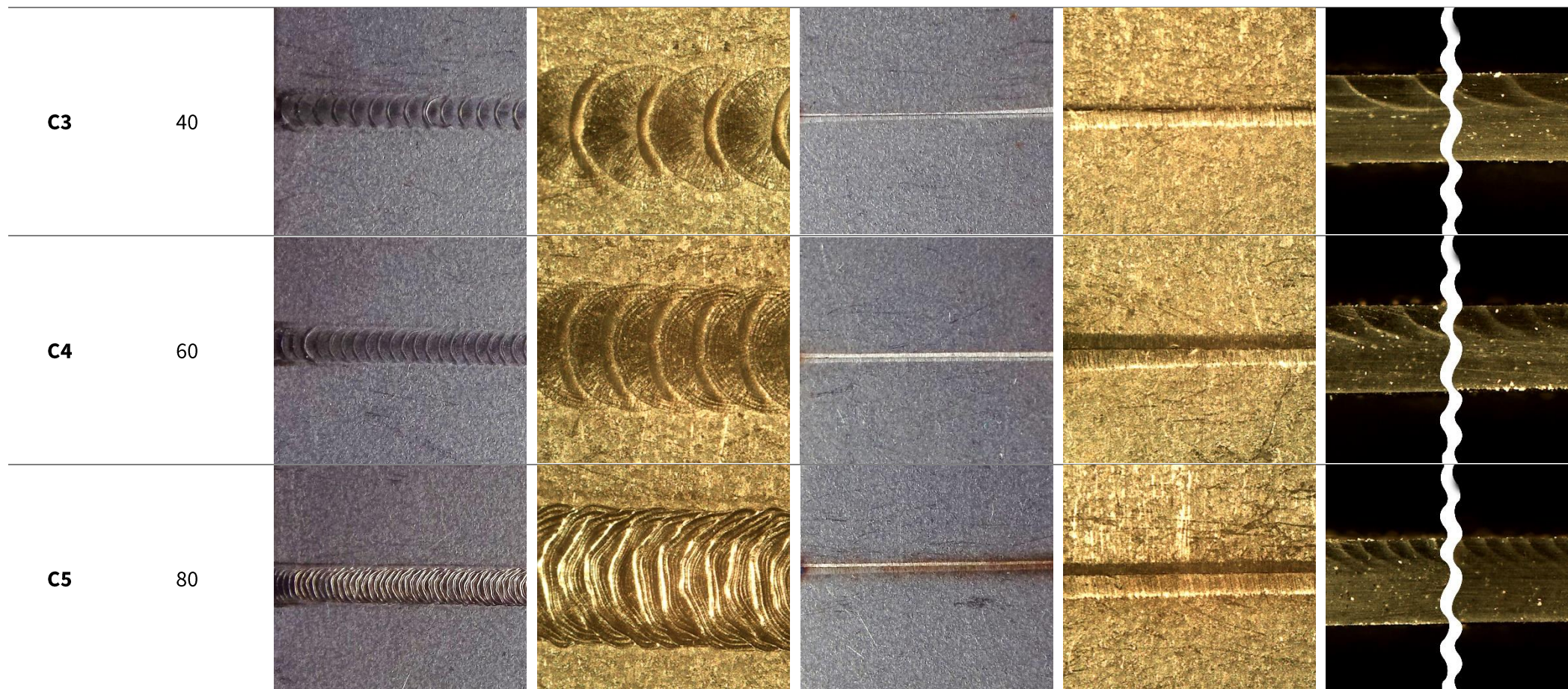
### 4.1.3. Influência da sobreposição dos pontos de soldadura


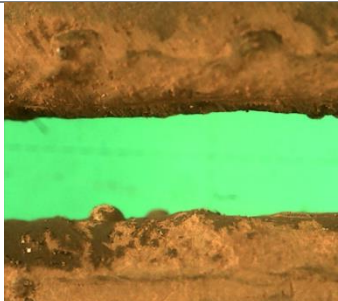

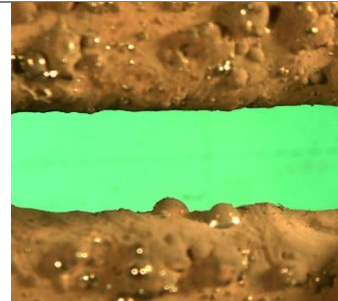
A Tabela 27 ilustra os resultados das amostras do grupo C.

Tabela 27 - Resultados das amostras do grupo C

Amostra	Sobreposição [%]	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio - zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio - zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio - zoom 15x)
<b>C1</b>	0					
<b>C2</b>	20					





<p><b>C6</b></p> <p>95</p>					<p>_11</p>
----------------------------	---	--	---	---	------------

Os resultados quantitativos estão representados na Tabela 28 e Figura 106.

<sup>11</sup> Não se apresenta imagem microscópica da penetração desta amostra uma vez que a chapa foi perfurada pelo laser.

Tabela 28 – Valores da penetração obtidos das amostras do grupo C

	Amostras	Sobreposição [%]	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo C	C1	0	0,37	0,38
	C2	20	0,37	0,38
	C3	40	0,39	0,39
	C4	60	0,42	0,40
	C5	80	0,41	0,37
	C6	95	0	0

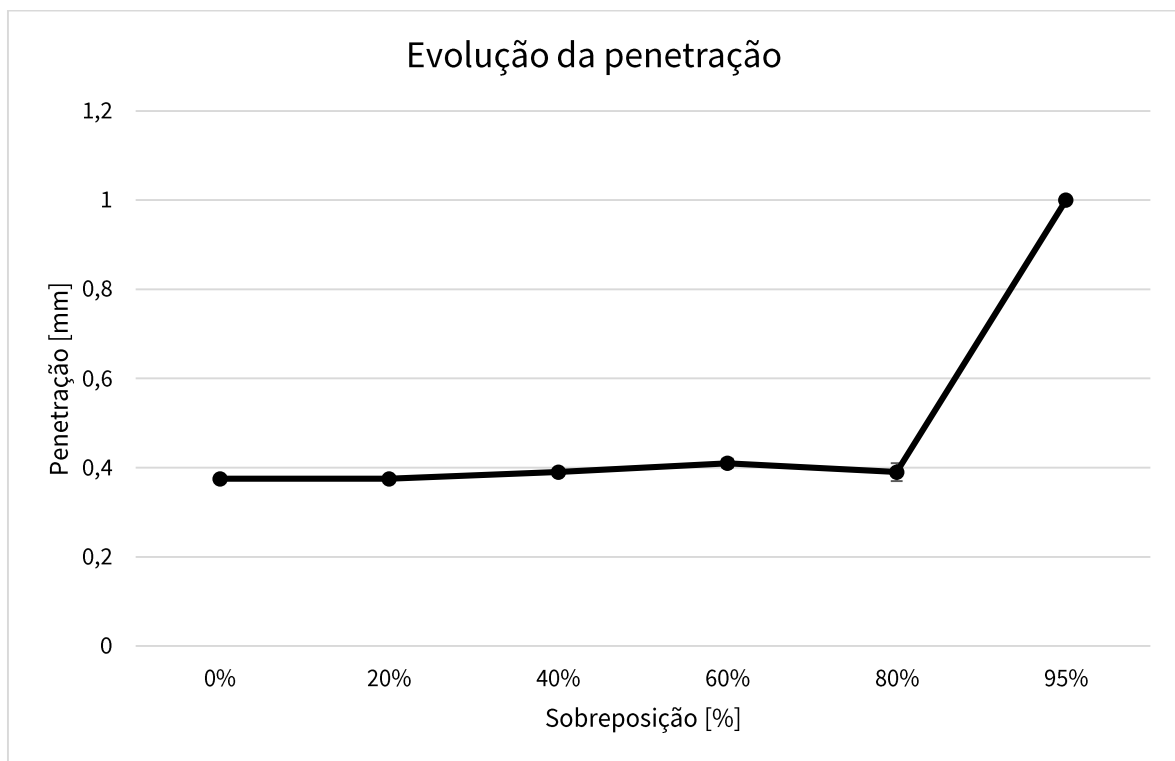


Figura 106 - Evolução da penetração das amostras do grupo C

De acordo com o previsto através da revisão bibliográfica, a sobreposição não afeta a penetração da soldadura mas só até ao valor de 80%. A partir deste valor esta regra já não se aplica.

Para a última amostra, foi aplicada uma sobreposição de 95%. Neste caso o laser pulsado assemelha-se ao laser contínuo uma vez que os pulsos são praticamente contínuos. Para este valor de sobreposição, as amostras são completamente derretidas e atravessadas pelo feixe.

O declive do cordão de soldadura praticamente não é influenciado pelos diferentes valores de sobreposição. Isto quer dizer que a penetração no início do cordão é muito semelhante à penetração no final do cordão.


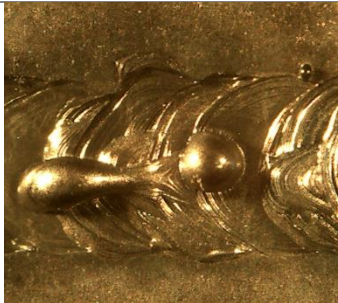

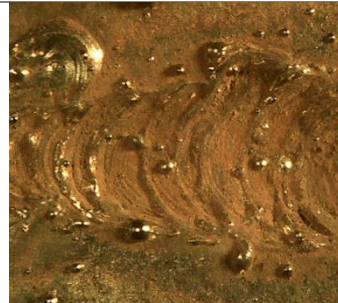
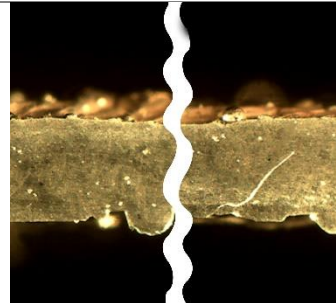



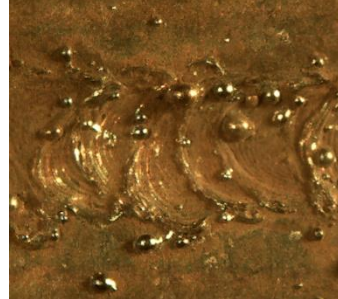
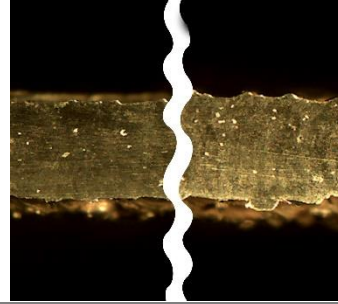
Para melhor perceber o que acontece entre a sobreposição de 80% e 95% torna-se pertinente analisar mais amostras que contenham sobreposições entre estes dois valores.



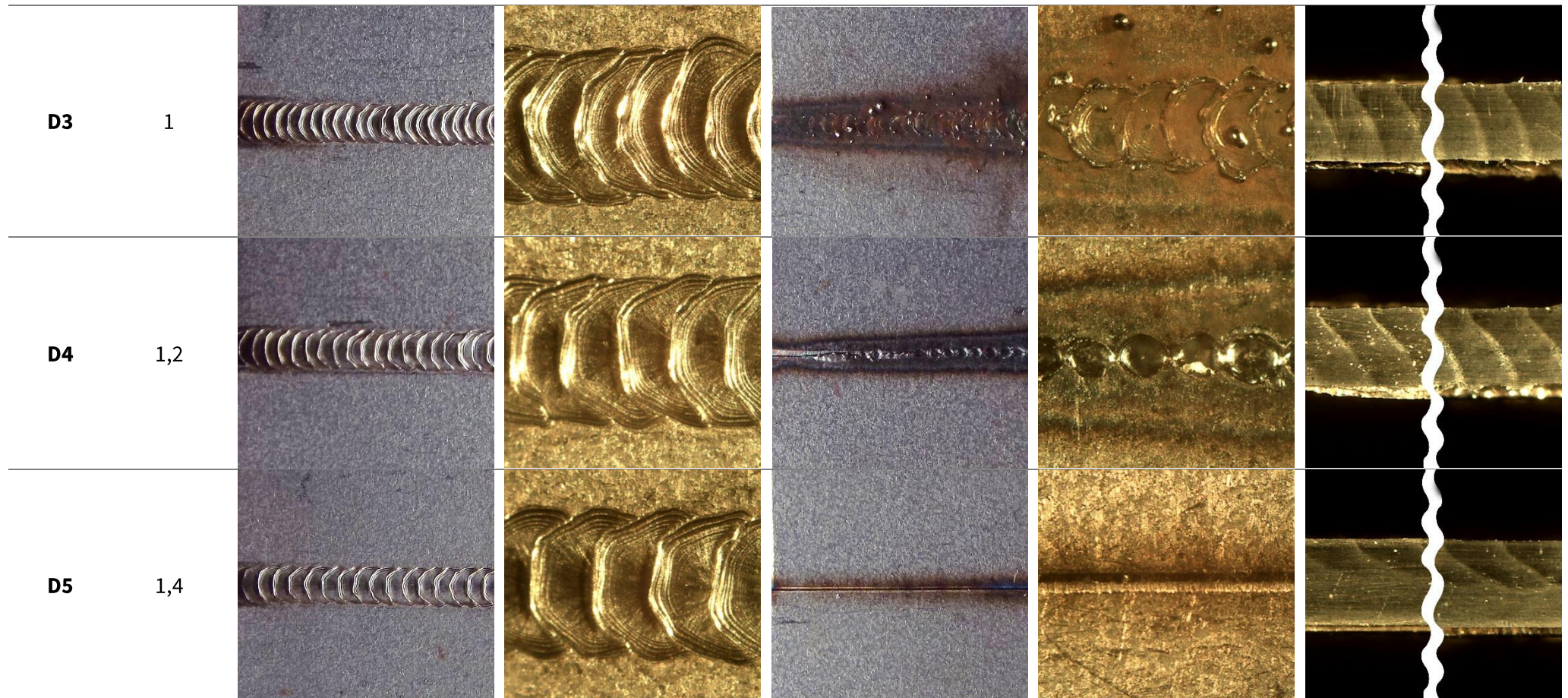
#### 4.1.4. Influência do diâmetro do feixe laser

A Tabela 29 ilustra os resultados das amostras do grupo D.

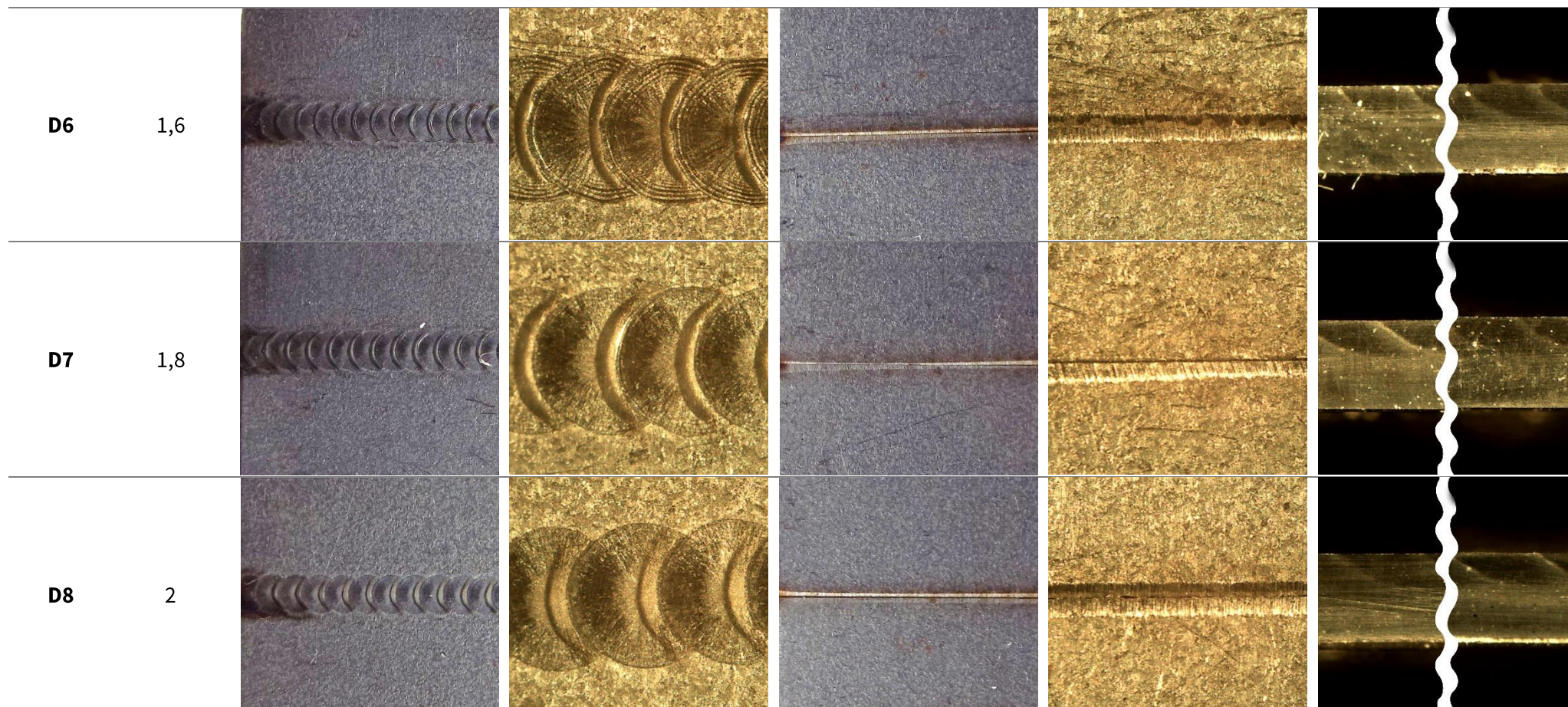
Tabela 29 - Resultados das amostras do grupo D

Amostra	Diâmetro [mm]	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio - zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio - zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio - zoom 15x)
D1	0,6					
D2	0,8					









Os resultados quantitativos estão representados na Tabela 30 e Figura 107.

Tabela 30 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo D

	Amostras	Diâmetro [mm]	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo D	D1	0,6	1	1
	D2	0,8	1	1
	D3	1	1	1
	D4	1,2	0,84	1
	D5	1,4	0,46	0,57
	D6	1,6	0,42	0,47
	D7	1,8	0,42	0,45
	D8	2	0,35	0,36

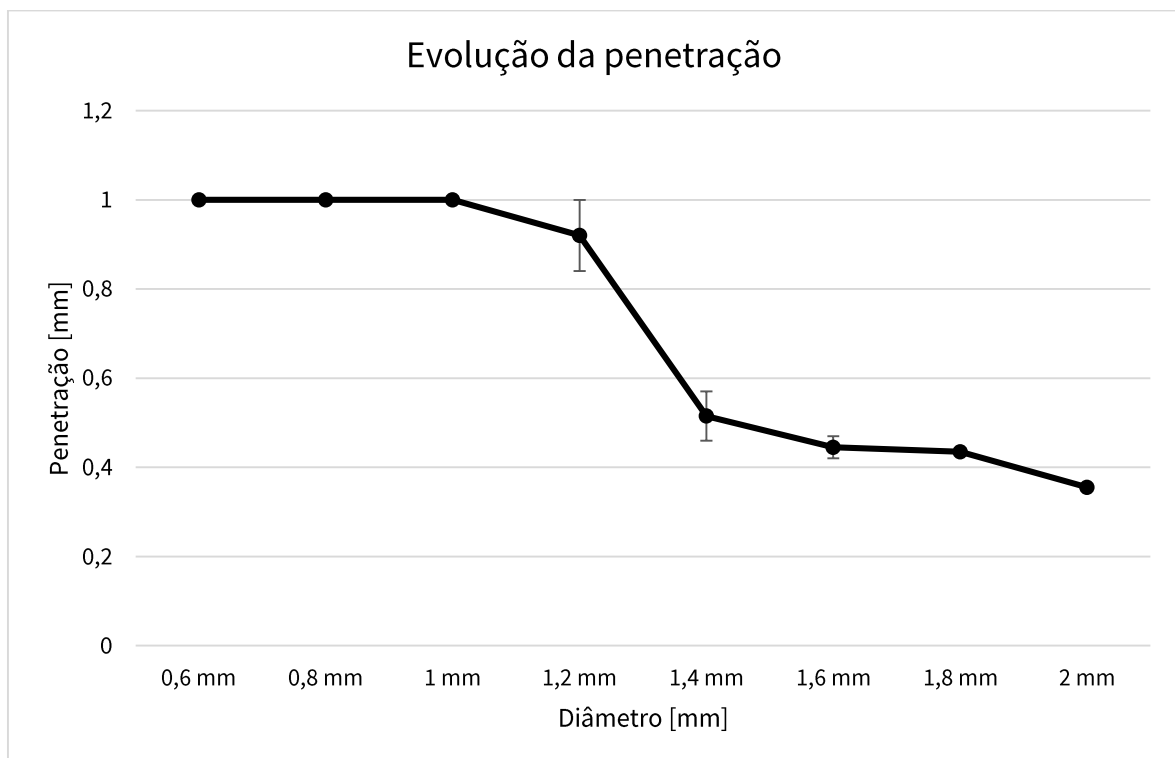


Figura 107 - Evolução da penetração das amostras do grupo D

Os resultados obtidos permitem concluir que a penetração da soldadura aumenta com a diminuição do diâmetro do feixe laser. Assim, concluiu-se que a equação (4) também é válida para a soldadura por laser pulsado no que se refere à influência do diâmetro na penetração da soldadura.

$$h = K \frac{P}{Dv} \quad (4)$$

A penetração é assim inversamente influenciada pelo diâmetro. Quanto maior o diâmetro menor a penetração e quanto menor o diâmetro maior a penetração.

A equação acima pode ser dividida da seguinte forma:

$$h = K \times \frac{1}{v} \times \frac{P}{D} \quad (17)$$

Em que:

$$\frac{P}{D} \quad (18)$$

É a densidade de energia e é comumente apresentada com as seguintes unidades: W/mm<sup>2</sup>.



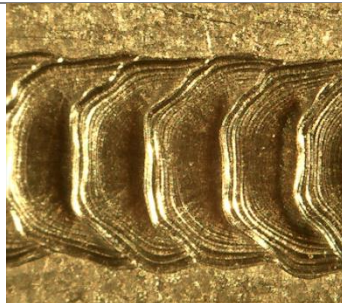

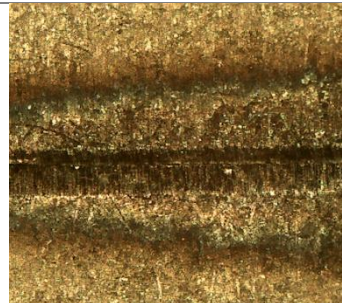
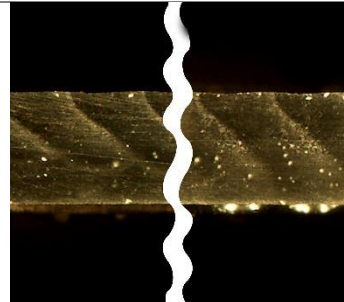


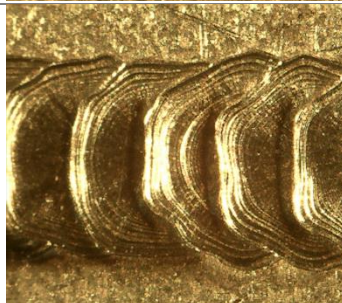

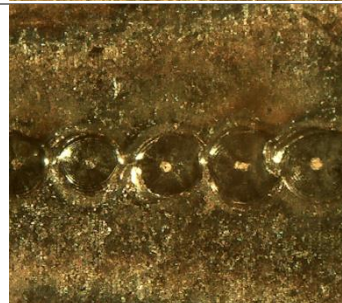
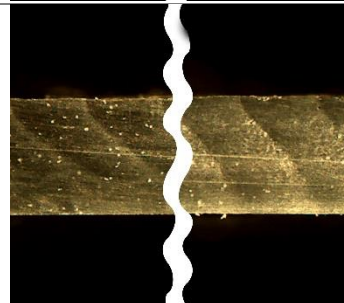
Quanto maior for o diâmetro, menor será a densidade de potência. Isto significa que, apesar de a potência do feixe laser ser a mesma, esta incide sobre uma área maior levando a uma diminuição do impacto do laser na peça. Quando o diâmetro do feixe laser diminui, a potência é toda canalizada para um ponto mais pequeno. O feixe laser é assim mais concentrado e mais potente provocando um aumento na penetração da soldadura.



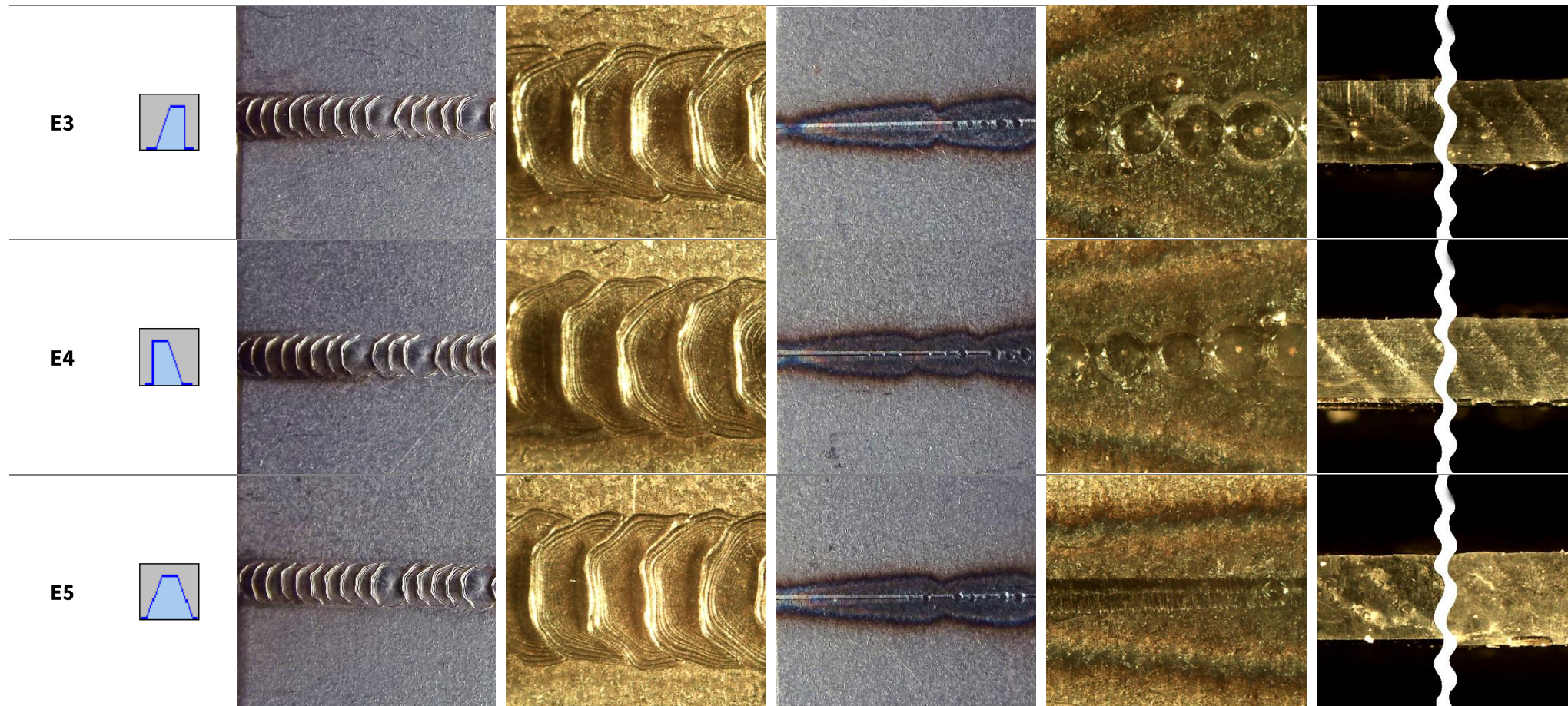
### 4.1.5. Influência do tipo de pulso do feixe laser

A Tabela 31 ilustra os resultados das amostras do grupo E.

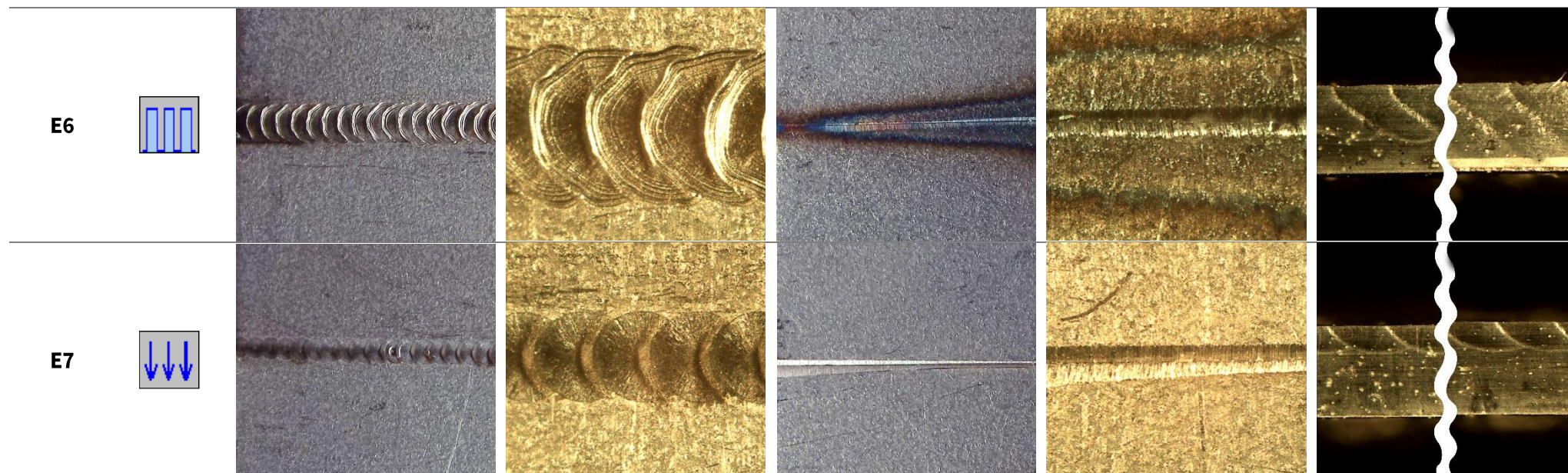
*Tabela 31 - Resultados das amostras do grupo E*

Amostra	Tipo pulso	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio – zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio – zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio – zoom 15x)
E1						
E2						









Os resultados quantitativos estão representados na Tabela 32 e Figura 108.



Tabela 32 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo E

	Amostras	Tipo de pulso	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo E	E1		0,56	1
	E2		0,54	1
	E3		0,52	1
	E4		0,60	1
	E5		0,59	1
	E6		0,52	0,90
	E7		0,28	0,32

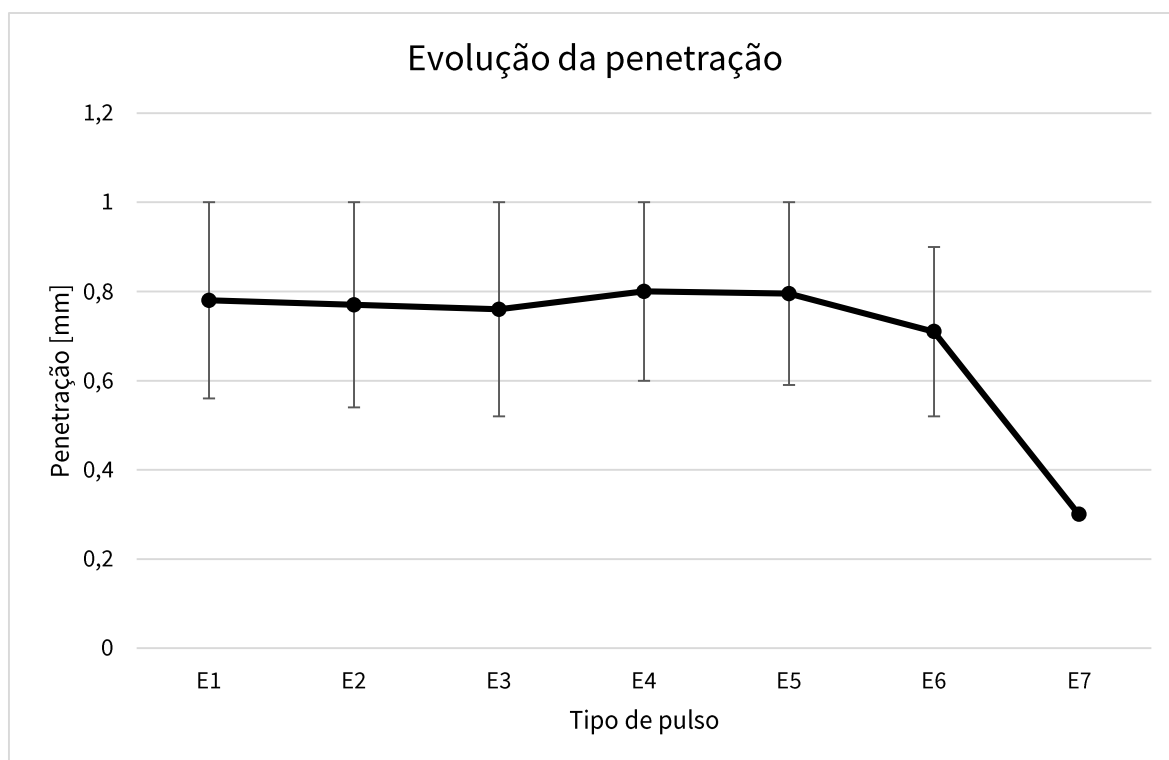


Figura 108 - Evolução da penetração das amostras do grupo E


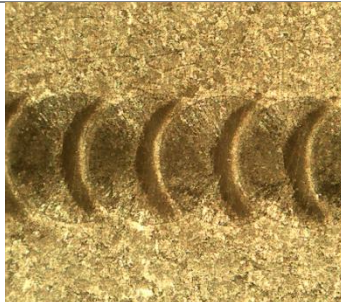


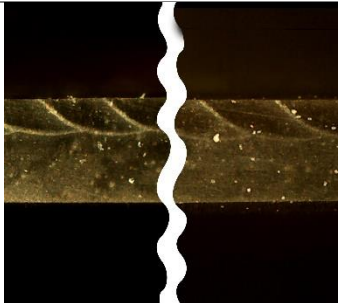
Os resultados alcançados mostram que os diferentes tipos de pulso têm praticamente o mesmo impacto na penetração da soldadura, com exceção da última amostra. Isto significa que para o aço DP1000 a penetração é pouco afetada pelos diferentes tipos de pulso disponíveis na máquina de soldadura laser.

O tipo de pulso utilizado na amostra E7, denominado escala expandida, provocou uma penetração na amostra muito reduzida quando comparada com as restantes. No entanto, este tipo de pulso mantém uma penetração praticamente constante ao longo de todo o cordão. Como nota final, importa referir que o pulso “escala expandida” é usado essencialmente como tratamento térmico.

### 4.1.6. Influência da energia do feixe laser

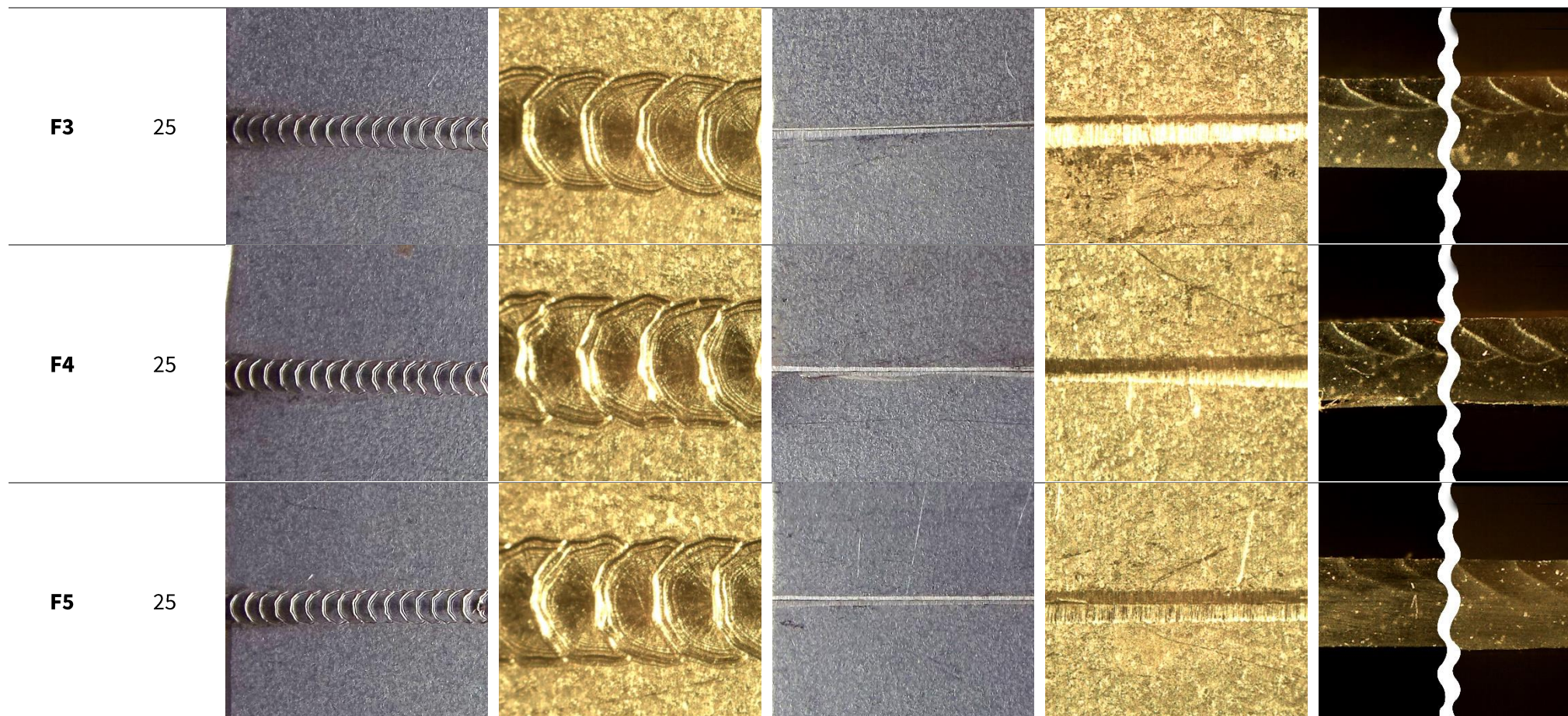
A Tabela 33 ilustra os resultados das amostras do grupo F.

*Tabela 33 - Resultados das amostras do grupo F*

Amostra	Energia [J]	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio - zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio - zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio - zoom 15x)
<b>F1<sup>12</sup></b>	25	-	-	-	-	-
<b>F2</b>	25					

<sup>12</sup> Os parâmetros de soldadura da amostra F1 não foram suficientemente capazes de soldar a amostra.





Os resultados quantitativos estão representados na Tabela 34 e Figura 109.

Tabela 34 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo F

	Amostras	Energia [J]	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo F	F1	25	-	-
	F2	25	0,33	0,36
	F3	25	0,33	0,41
	F4	25	0,39	0,51
	F5	25	0,36	0,49

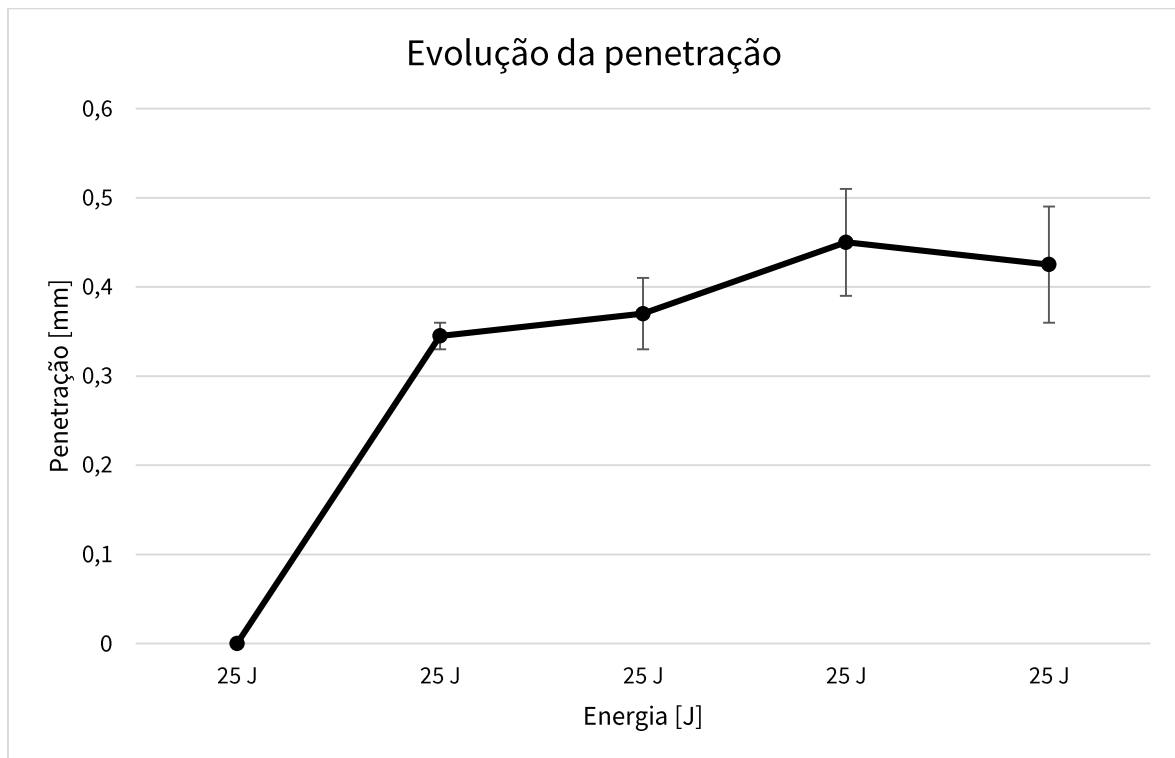


Figura 109 - Evolução da penetração das amostras do grupo F

Este parâmetro foi estudado com o propósito de descobrir se este parâmetro poderia ser o único responsável pela penetração da soldadura. Ou seja, pretende-se estudar se a penetração é unicamente influenciada pela quantidade de energia aplicada na soldadura laser.

Os resultados obtidos mostram que a energia não pode ser o único fator responsável pela penetração da soldadura.

Os parâmetros utilizados para soldar a amostra F1 não foram suficientes para provocar penetração. No entanto, os parâmetros utilizados nas restantes amostras foram suficientes para causar penetração e todas as amostras foram soldadas com uma energia de 25J.

Naturalmente, espera-se que quantidades mais elevadas de energia provoquem alterações mais acentuadas na microestrutura do material a soldar.


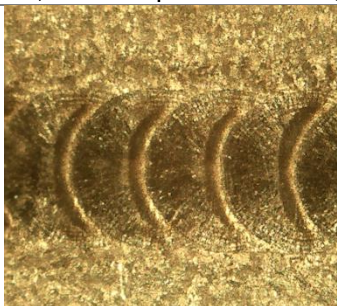
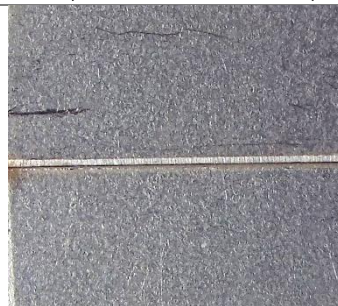
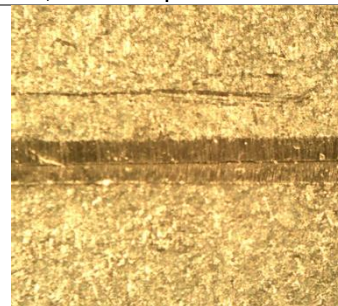
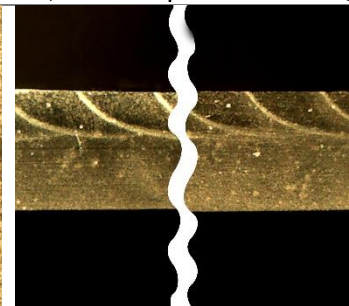

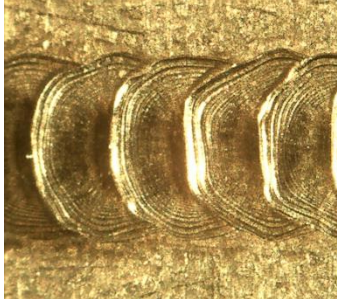

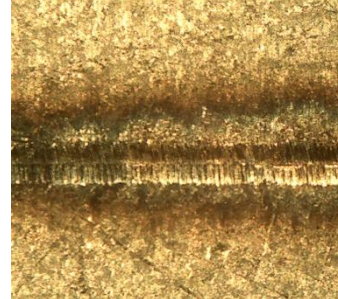
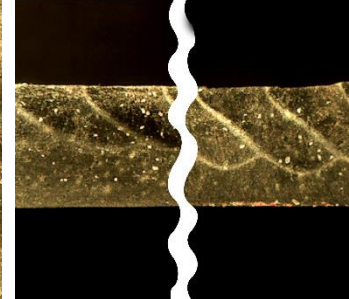
Uma boa soldadura deverá ser aquela que conseguirá a maior penetração com a menor quantidade de energia aplicada no processo. Isto irá reduzir as alterações microestruturais no material.



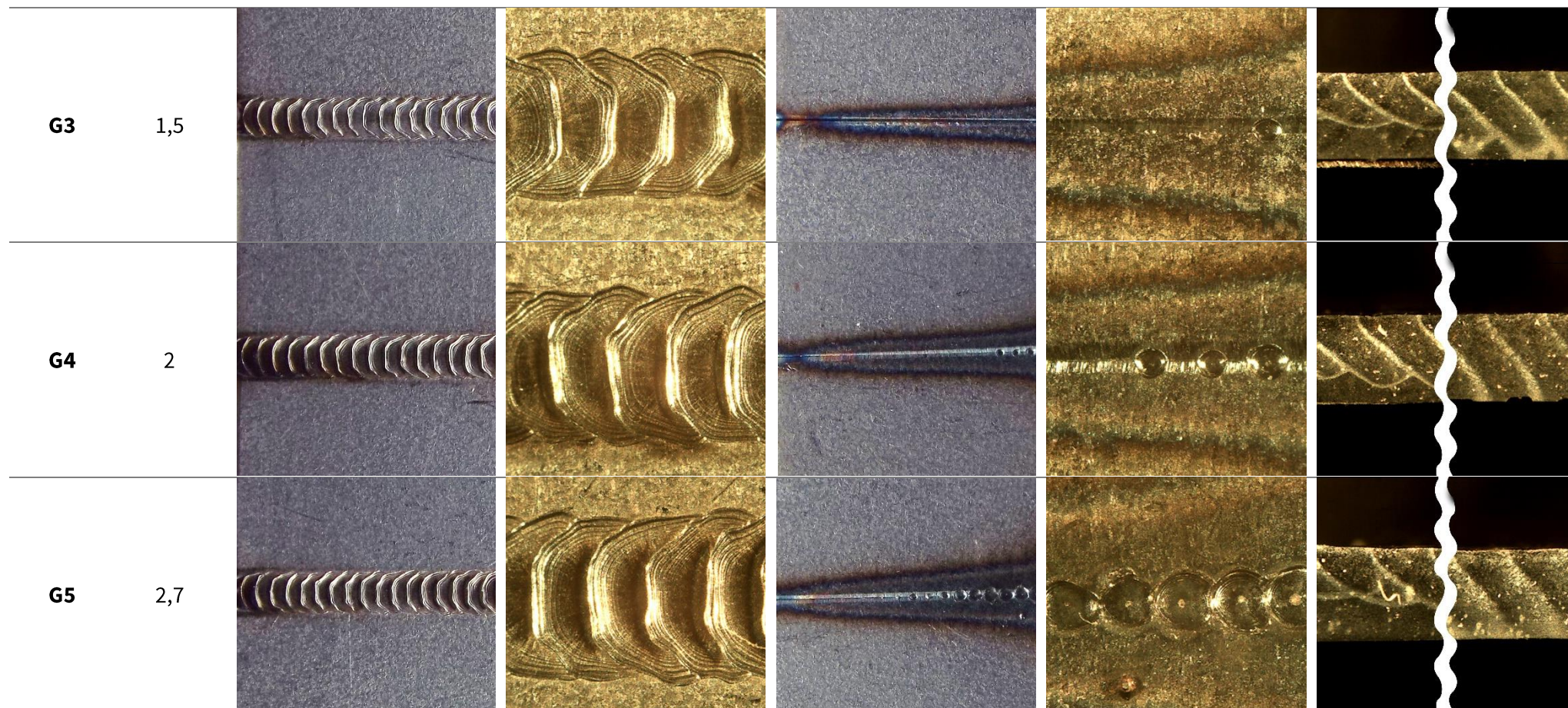
### 4.1.7. Influência da velocidade de soldadura

A Tabela 35 ilustra os resultados das amostras do grupo G.

*Tabela 35 - Resultados das amostras do grupo G*

Amostra	Velocidade [mm/s]	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio - zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio - zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio - zoom 15x)
<b>G1</b>	0,1					
<b>G2</b>	1					





Os resultados quantitativos estão representados na Tabela 36 e Figura 110.

Tabela 36 - Valores da penetração obtidos das amostras do grupo G

	Amostras	Velocidade [mm/s]	Penetração	
			Mínima [mm]	Máxima [mm]
Grupo G	G1	0,1	0,42	0,42
	G2	1	0,49	0,76
	G3	1,5	0,52	1
	G4	2	0,56	1
	G5	2,7	0,55	1

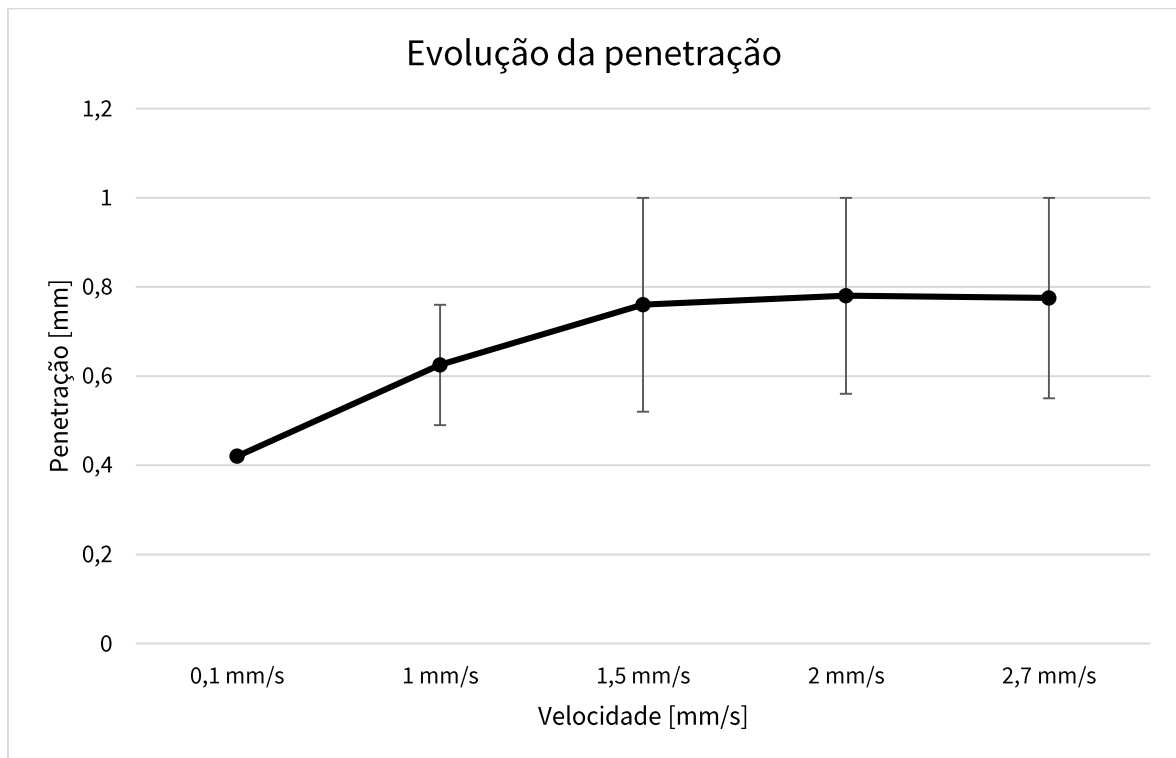


Figura 110 - Evolução da penetração das amostras do grupo G

Estes resultados mostraram-se muito surpreendentes pois, de acordo com o pesquisado anteriormente, esperava-se que quanto maior fosse a velocidade menor fosse a penetração. Se assim fosse, a equação (4), válida para lasers contínuos, seria também totalmente válida para lasers pulsados.

$$h = K \frac{P}{Dv} \quad (4)$$

No entanto, os resultados revelam que a velocidade tem o efeito precisamente contrário àquilo que se especulava. Ou seja, quanto maior a velocidade, maior é a penetração da soldadura. Assim sendo, a equação acima não se aplica para este material. No entanto, a equação pode ser válida para lasers pulsados mas para outros materiais. Entende-se que a penetração do aço DP1000 possa ser traduzida pela seguinte equação:

$$h = K \frac{P}{Dv} - \frac{k'}{v} \quad (19)$$

Em que  $k'$  é uma constante que depende da dissipação do calor e das propriedades do material.

Nesta equação, a penetração é diretamente influenciada pela velocidade. Assim, quanto maior a velocidade maior a penetração. Por outro lado, quanto menor a velocidade menor a penetração.

Este facto pode ser explicado da seguinte forma. Dada a reduzida espessura e tamanho da amostra a soldar, assim que o feixe laser incide na peça, o calor é rapidamente conduzido por toda a peça aumentando localmente a sua temperatura. O material fica assim mais “macio” e facilita a penetração do feixe laser. No entanto, o calor também sai da peça pelo efeito de convecção, facto que numa chapa fina é especialmente significativo. Quanto maior for a velocidade de soldadura, menos tempo o material tem para arrefecer e a temperatura do material vai aumentando até ao fim da soldadura. Quanto menor for a velocidade de soldadura, o material tem mais tempo para arrefecer e, portanto, apesar da peça aquecer continuamente até ao final da soldadura, esta não aquece tanto. Além disso, os ciclos de aquecimento e posterior arrefecimento alteraram a microestrutura do material, provocando um aumento da dureza do material dificultando ainda mais a penetração.

Este contraste de resultados pode ser explicado com base nos diferentes valores de condutibilidade térmica dos materiais em questão. Uma vez que a condutibilidade térmica do

aço inoxidável é de 16 (W/(mK)) [60] e a do aço DP1000 é de aproximadamente 30 (W/(mK))<sup>13</sup>. O aço inoxidável tem mais propensão para “reter” o calor enquanto que o aço DP1000 tem mais facilidade em conduzir o calor. O Gráfico 1 descreve uma representação somente ilustrativa do ciclo de temperatura média a que uma amostra está sujeita aquando do processo de soldadura laser. Os valores de temperatura contidos neste gráfico são meramente utilizados para melhor compreender o conceito que se pretende referir.

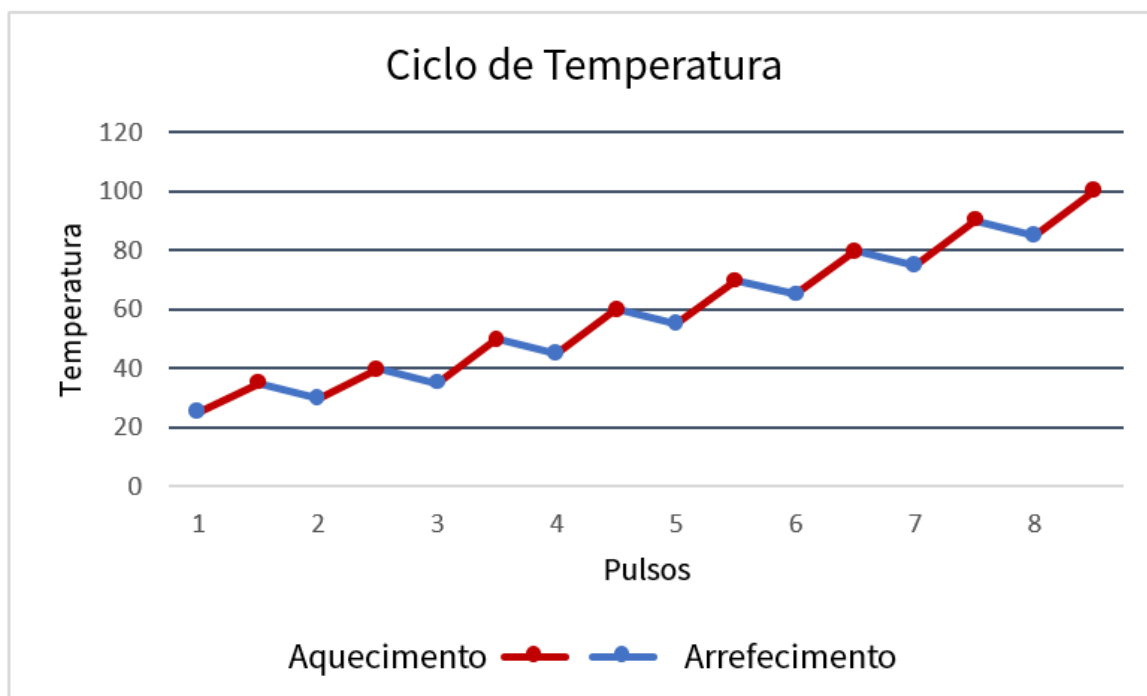


Gráfico 1 - Ciclo de temperatura

Quanto maior for a velocidade de soldadura, menores são as pausas entre as emissões dos pulsos laser e, consequentemente, menores são os períodos de arrefecimento. Por outro lado, quanto menor for a velocidade, maiores são as pausas entre as emissões dos pulsos laser resultando em períodos mais longos de arrefecimento. A temperatura da peça no final da soldadura é menor quando se utilizam velocidades mais baixas. Isto quer dizer que, quanto maior a velocidade, maior vai ser a temperatura da peça resultando em penetrações maiores.

Quanto mais baixa for a velocidade, mais constante é a penetração ao longo do cordão e quanto maior elevada for a velocidade, menos constante é a penetração.

<sup>13</sup> A condutividade térmica do aço DP980 é de 30 (W/(mK)) [66][43]. Uma vez que não se encontrou a condutividade térmica do aço DP1000, estima-se que esta seja muito próxima da do aço DP980.



## 4.2. Parâmetros ótimos

### 4.2.1. Ensaios de tração

Nesta secção pretendem-se mostrar os resultados dos testes que visam encontrar os parâmetros de soldadura que melhor garantem o equilíbrio entre boa penetração e boas propriedades mecânicas do aço *dual-phase* 1000.

A Tabela 37 mostra os resultados da medição da secção dos provetes feita com um micrómetro.

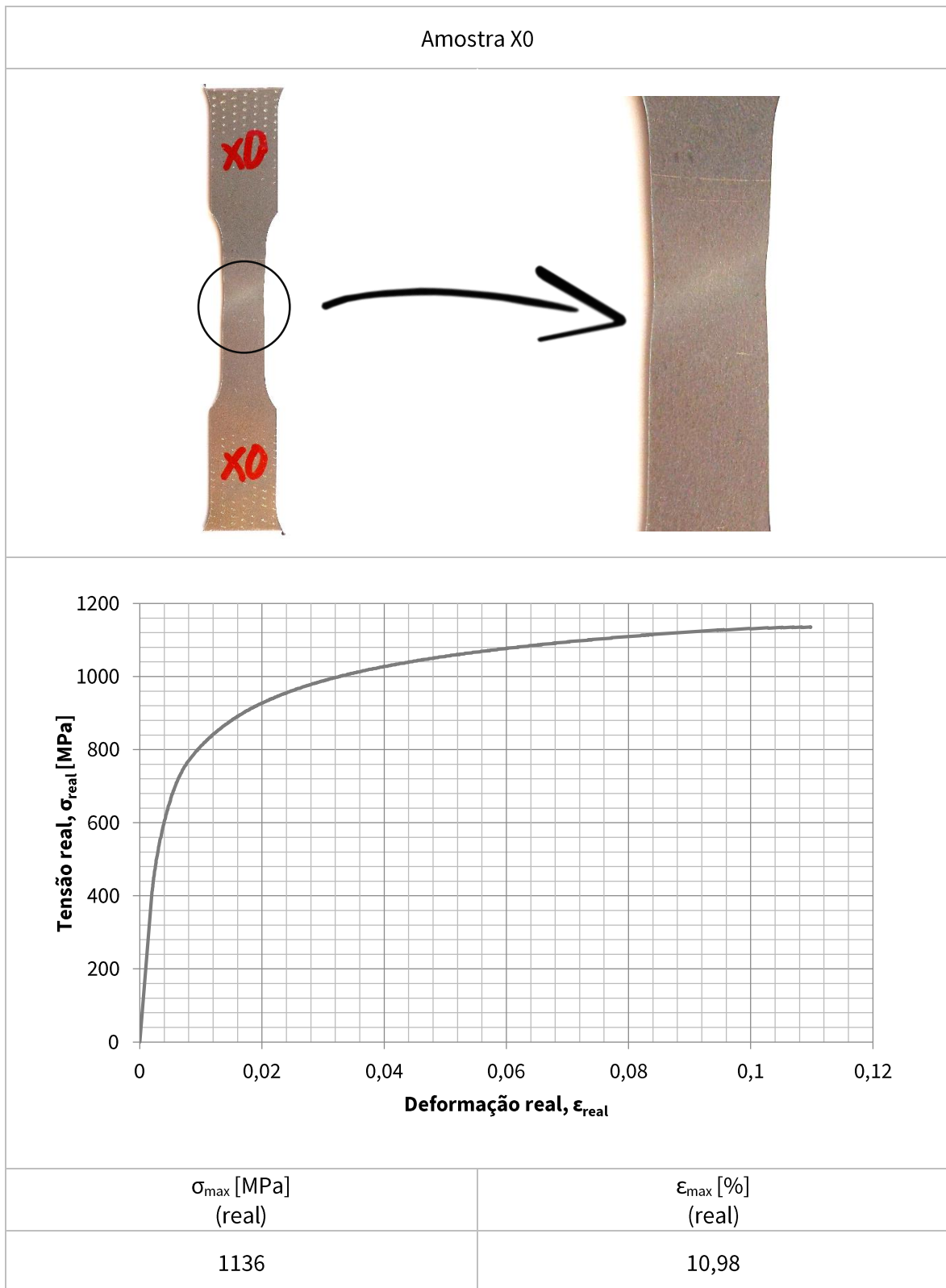
*Tabela 37 - Medição da secção do provete*

Amostra	Largura [mm]		Largura média [mm]	Espessura [mm]		Espessura média [mm]	Área média [mm <sup>2</sup> ]
	DA	DB		DC	DD		
X0	9,268	9,270	9,269	1,020	1,020	1,020	9,454
X1	9,265	9,265	9,265	0,690	0,690	0,690	6,393
X2	9,261	9,265	9,263	0,681	0,662	0,672	6,220
X3	9,278	9,265	9,272	0,59	0,545	0,568	5,262
X4	9,267	9,274	9,271	0,675	0,685	0,680	6,304
X5	9,265	9,269	9,267	0,635	0,651	0,643	5,959
X6	9,268	9,286	9,277	0,697	0,695	0,696	6,457
X7	9,289	9,269	9,279	0,675	0,701	0,688	6,384
X8	9,270	9,310	9,290	0,580	0,605	0,593	5,509
X9	9,270	9,280	9,275	0,635	0,640	0,638	5,917
X10	9,275	9,285	9,280	0,570	0,630	0,600	5,568

A amostra X0 resume-se a um provete sem soldadura (só metal base) que serve para comparar os resultados dos ensaios de tração deste provete com os demais provetes soldados com os diferentes parâmetros de soldadura.

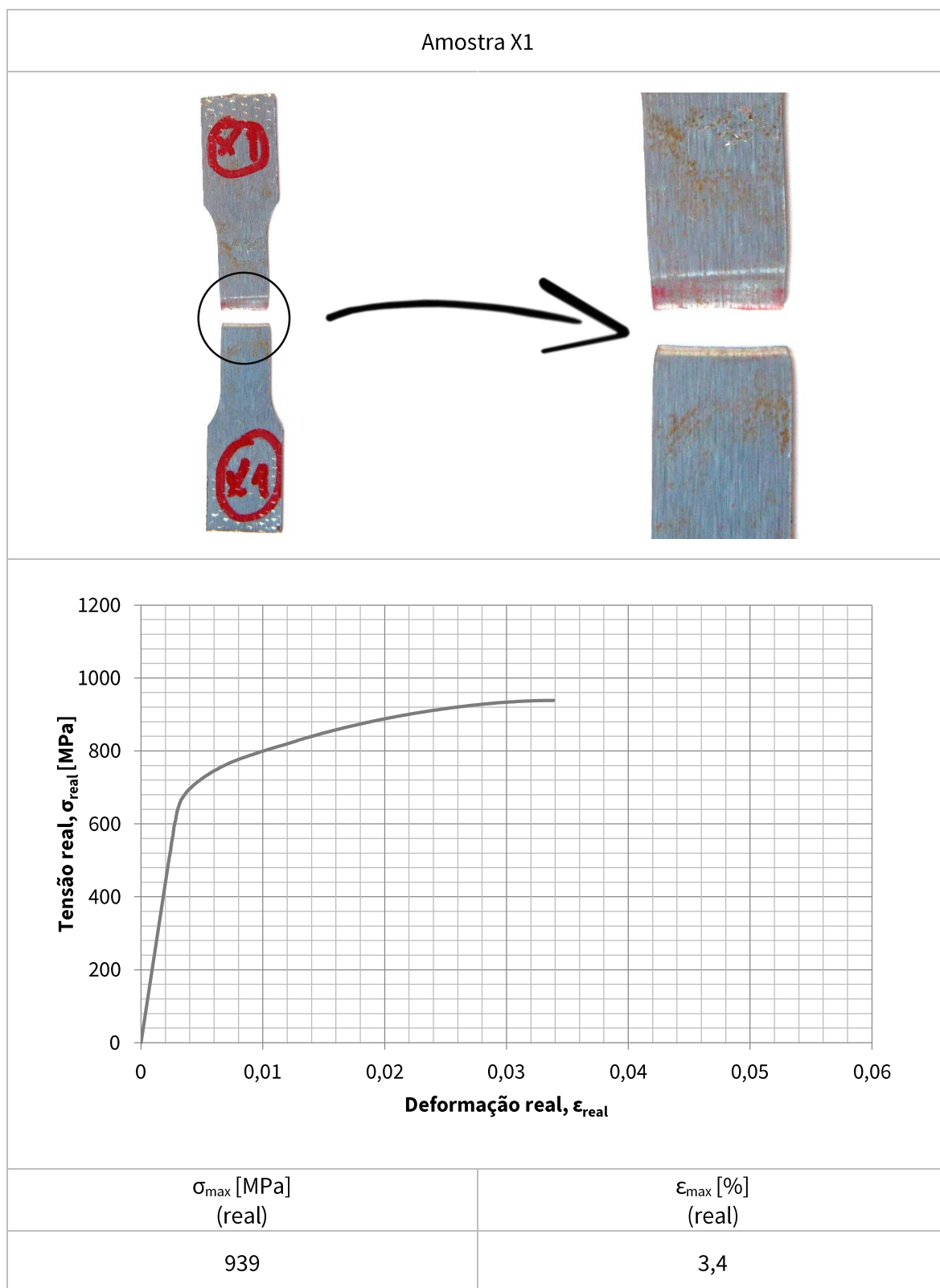
Os resultados do ensaio de tração da amostra X0 estão representados na Tabela 38.

Tabela 38 – Resultados do ensaio de tração da amostra X0



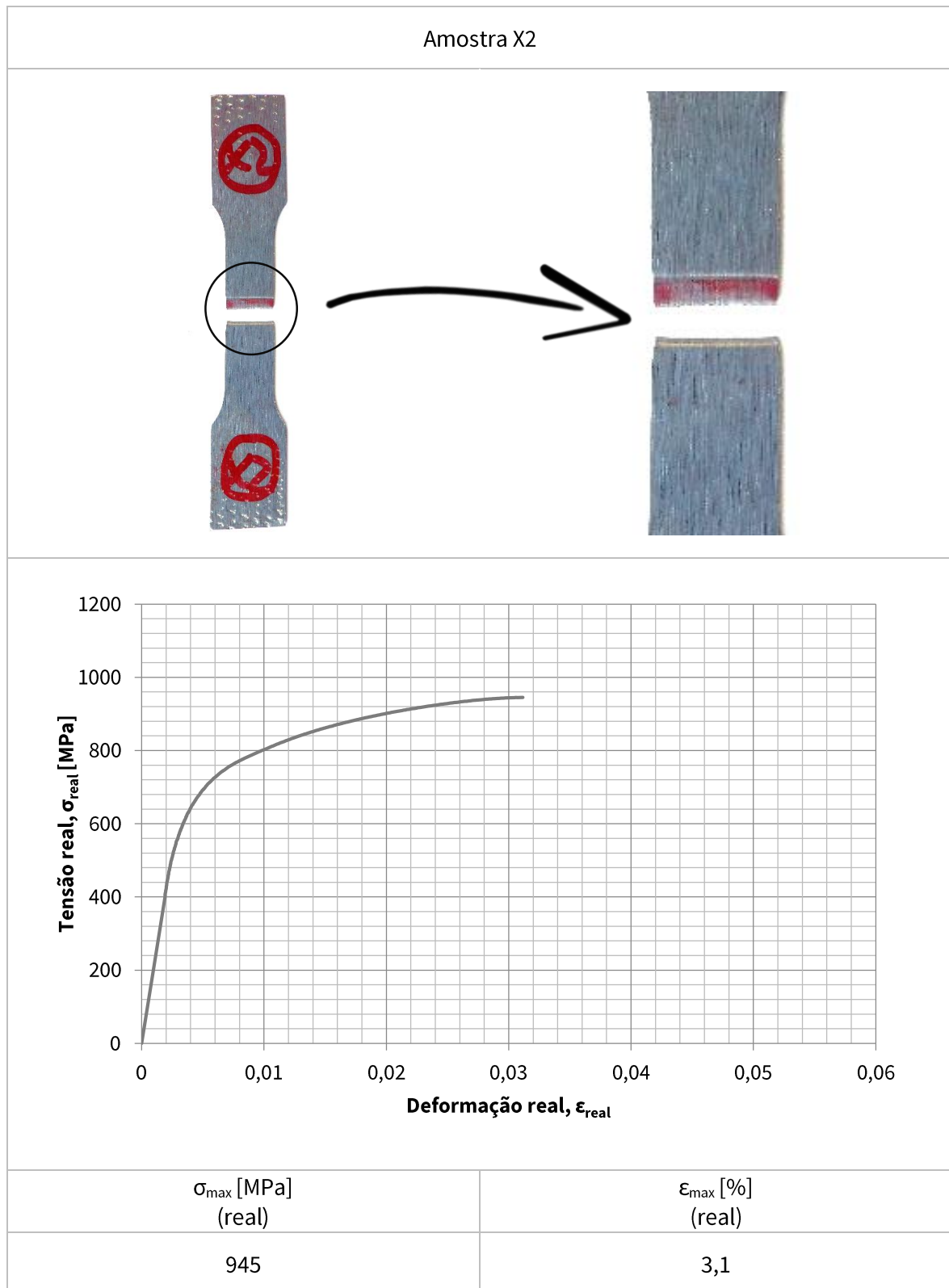
Os resultados do ensaio de tração da amostra X1 estão representados na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados do ensaio de tração da amostra X1



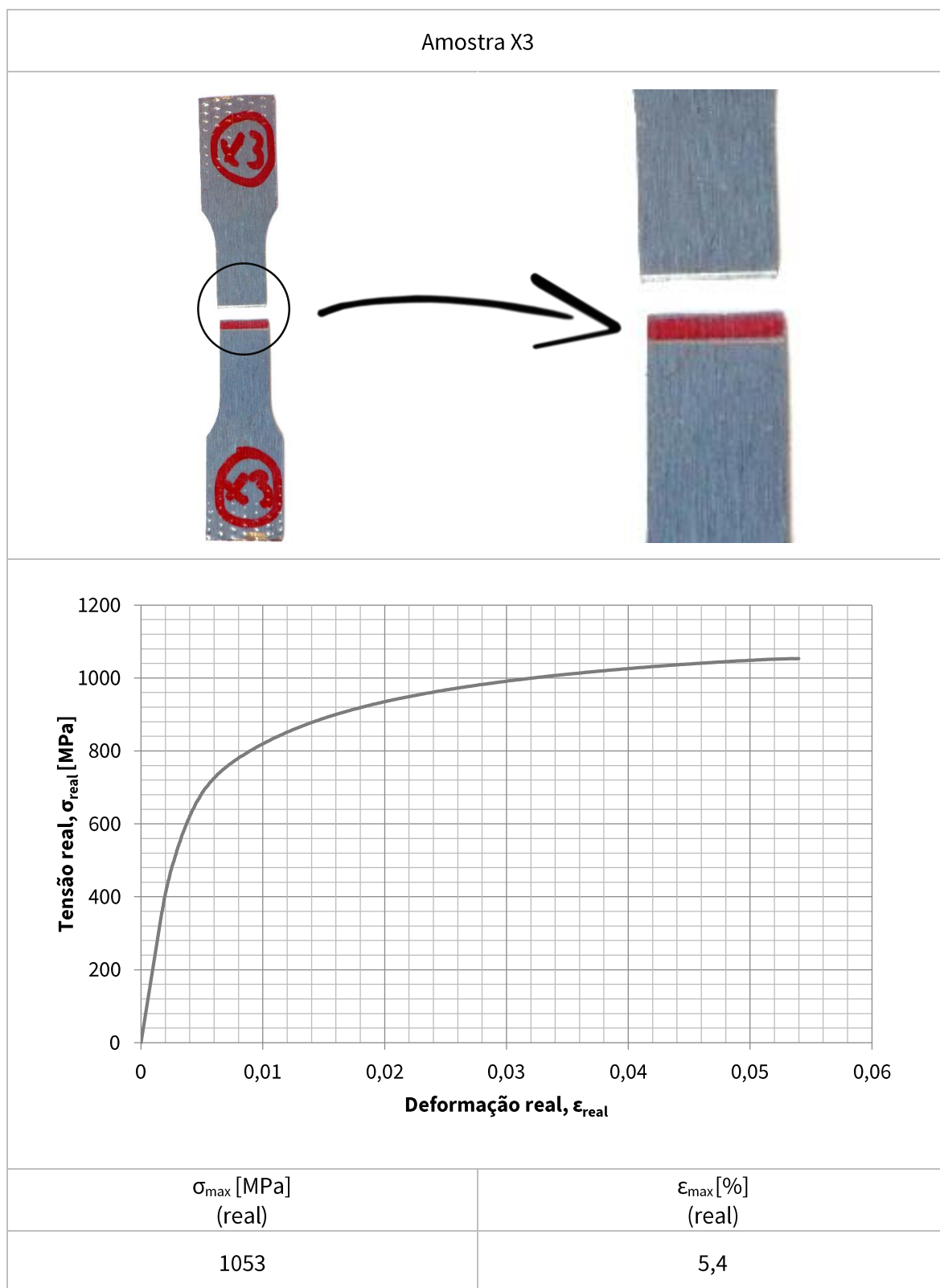
Os resultados do ensaio de tração da amostra X2 estão representados na Tabela 40.

Tabela 40 - Resultados do ensaio de tração da amostra X2



Os resultados do ensaio de tração da amostra X3 estão representados na Tabela 41.

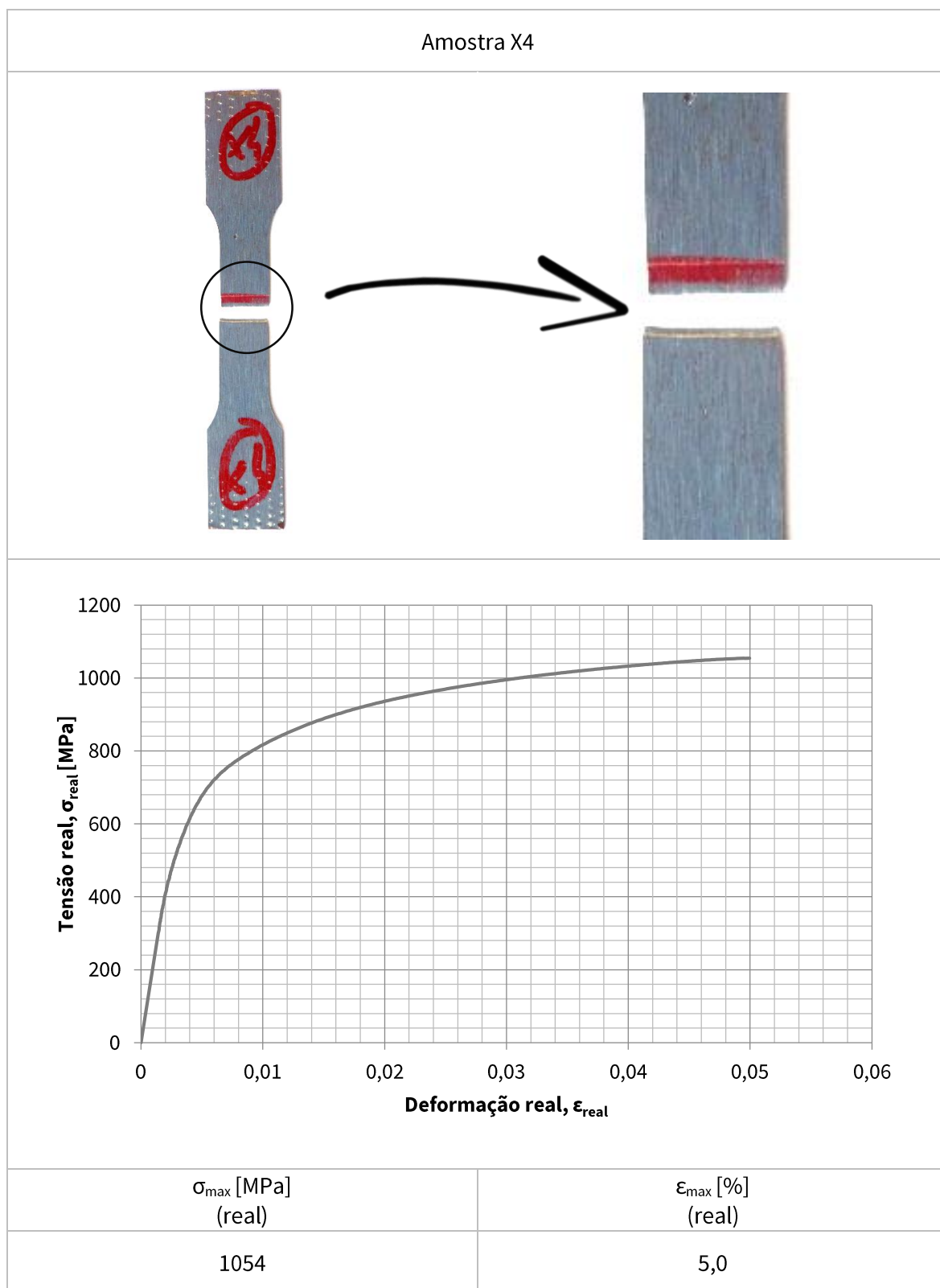
Tabela 41 - Resultados do ensaio de tração da amostra X3





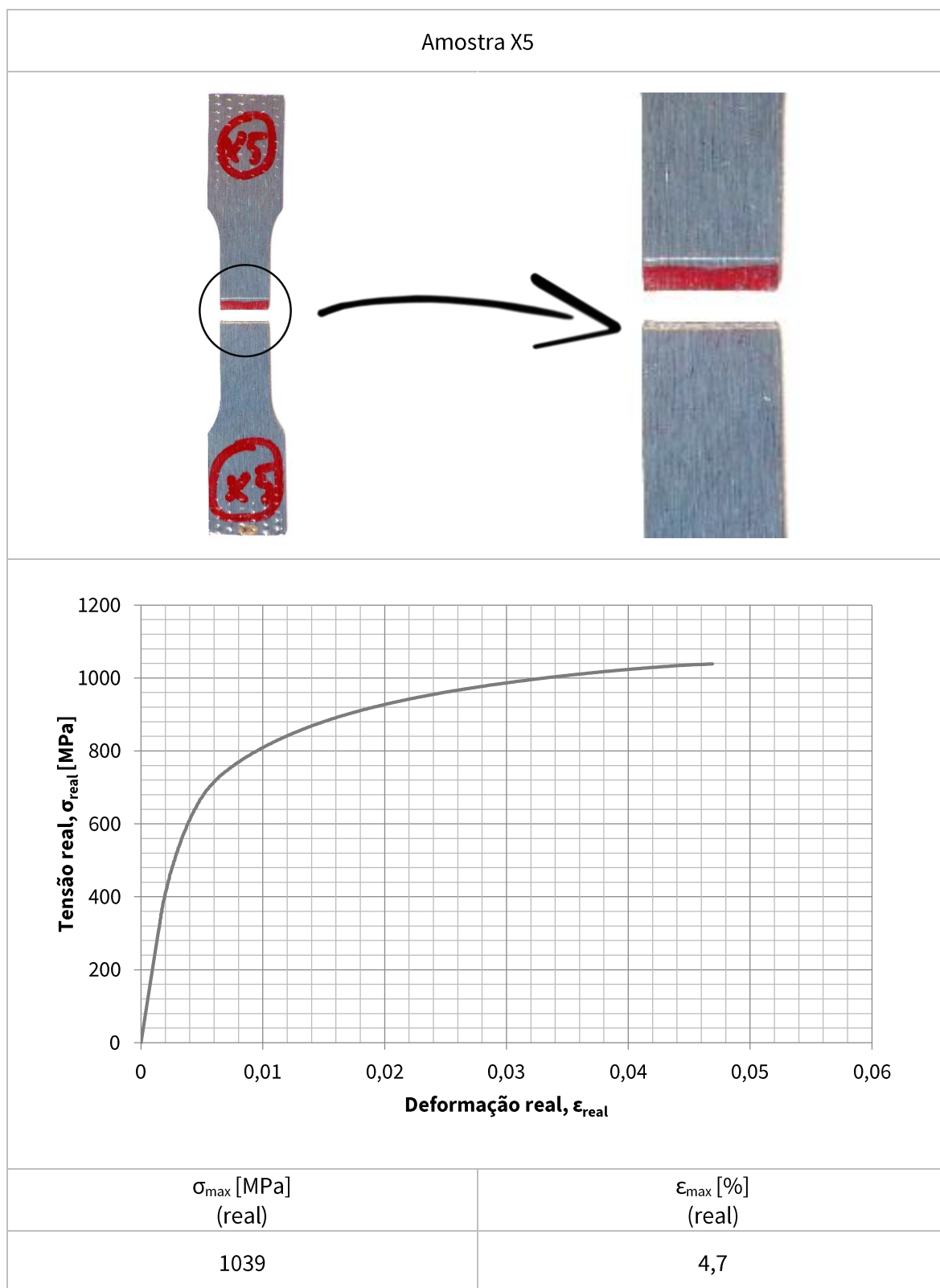
Os resultados do ensaio de tração da amostra X4 estão representados na Tabela 42.

Tabela 42 - Resultados do ensaio de tração da amostra X4



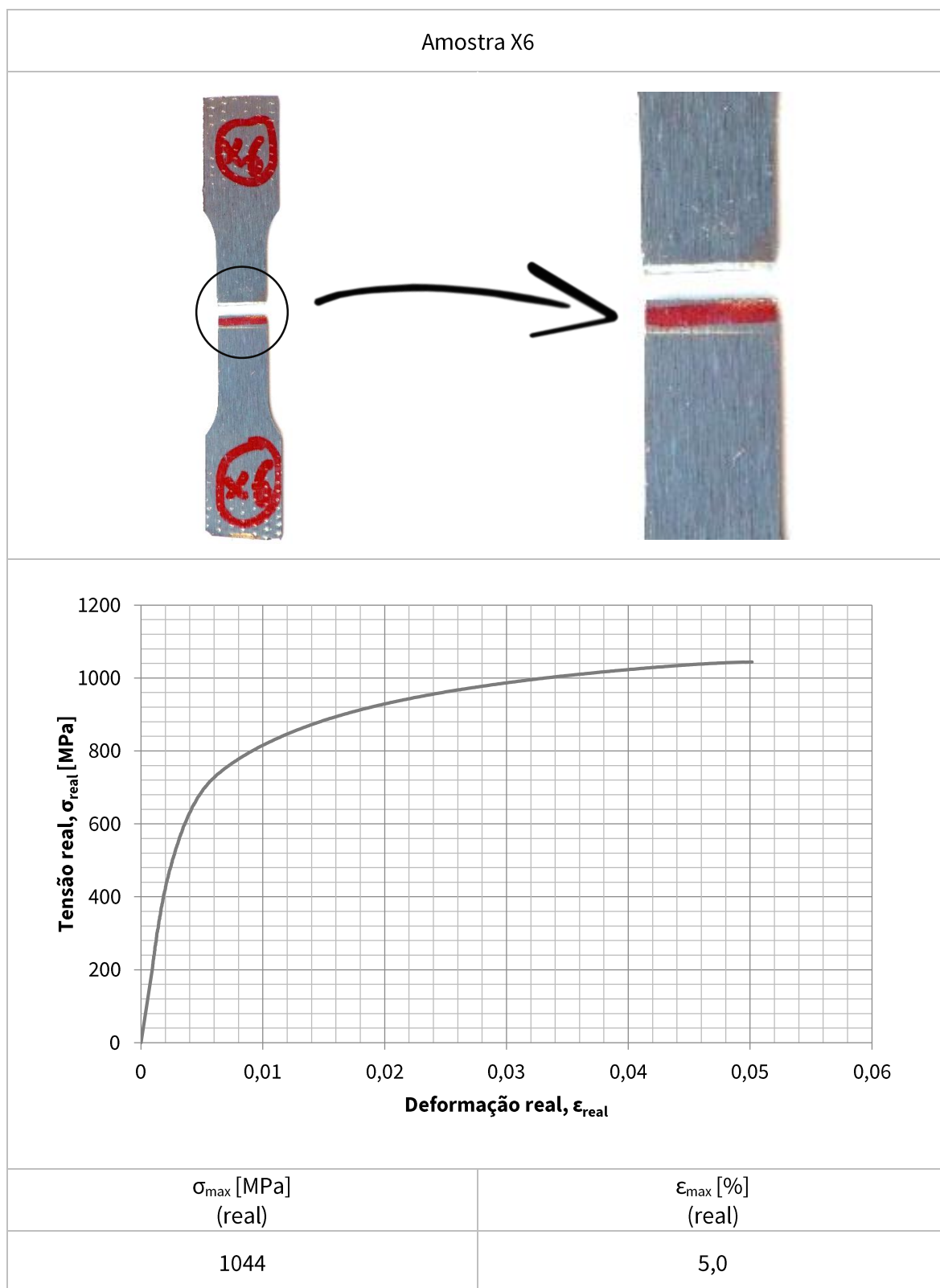
Os resultados do ensaio de tração da amostra X5 estão representados na Tabela 43.

Tabela 43 - Resultados do ensaio de tração da amostra X5



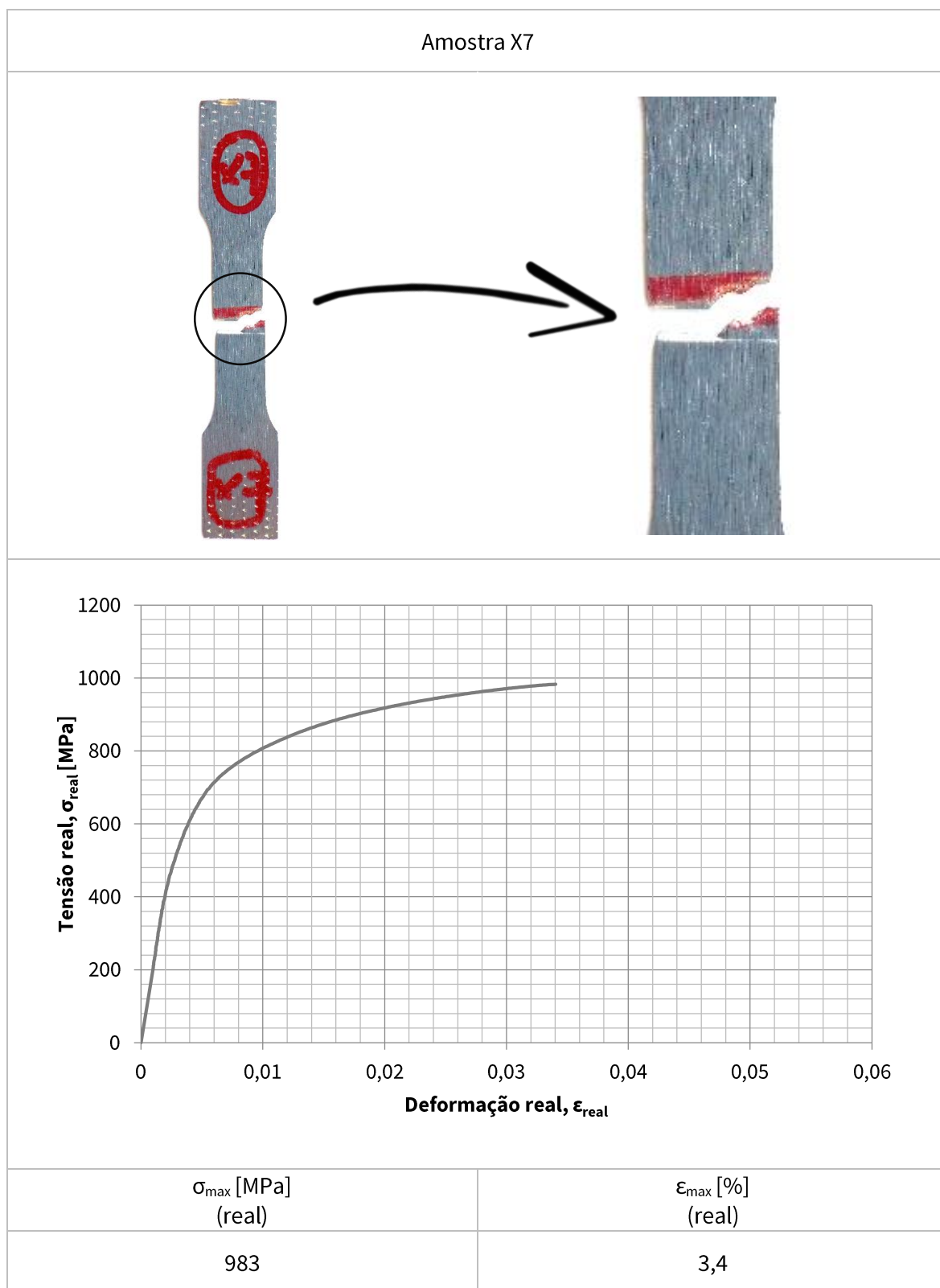
Os resultados do ensaio de tração da amostra X6 estão representados na Tabela 44.

Tabela 44 - Resultados do ensaio de tração da amostra X6



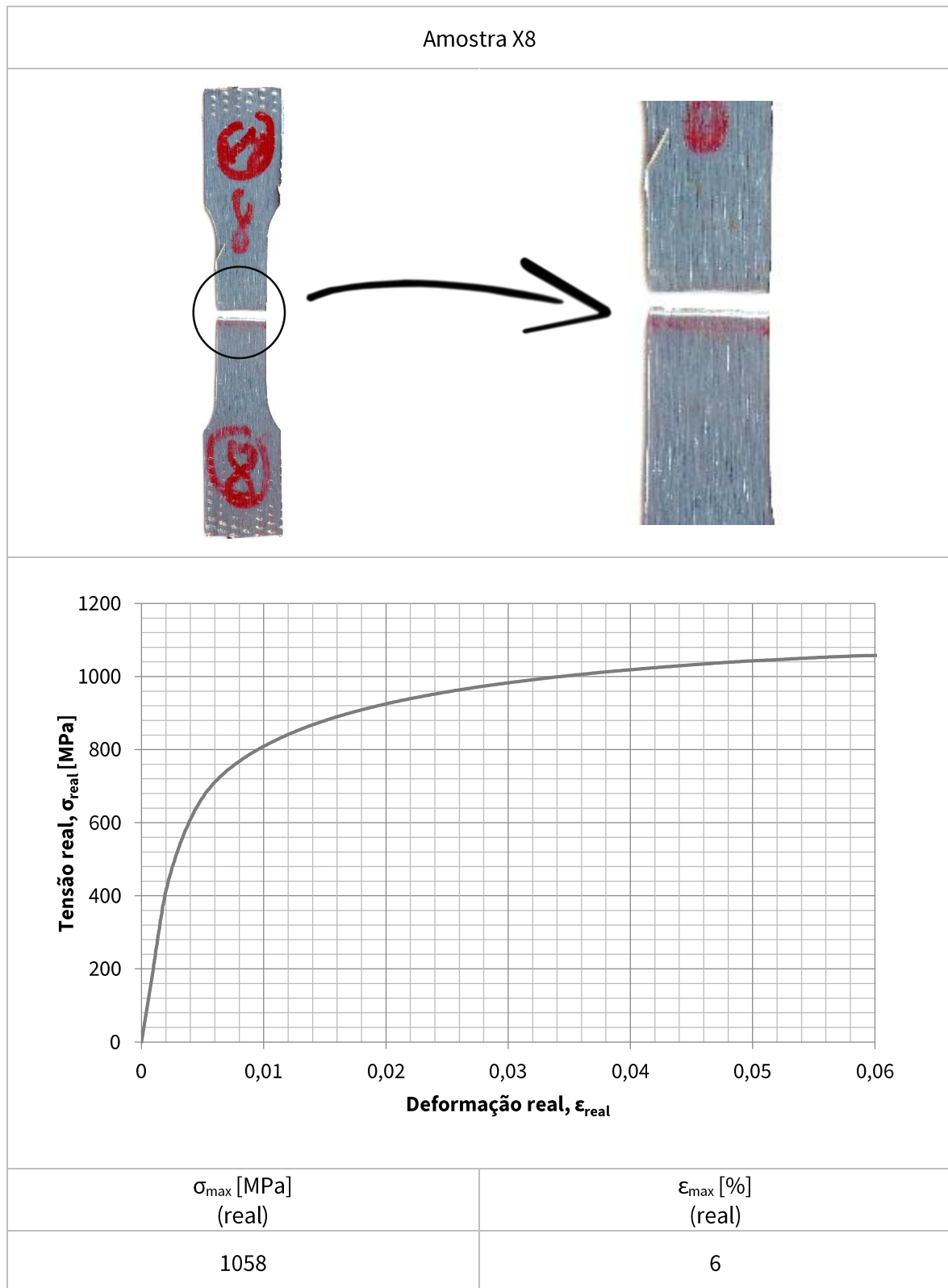
Os resultados do ensaio de tração da amostra X7 estão representados na Tabela 45.

Tabela 45 - Resultados do ensaio de tração da amostra X7



Os resultados do ensaio de tração da amostra X8 estão representados na Tabela 46.

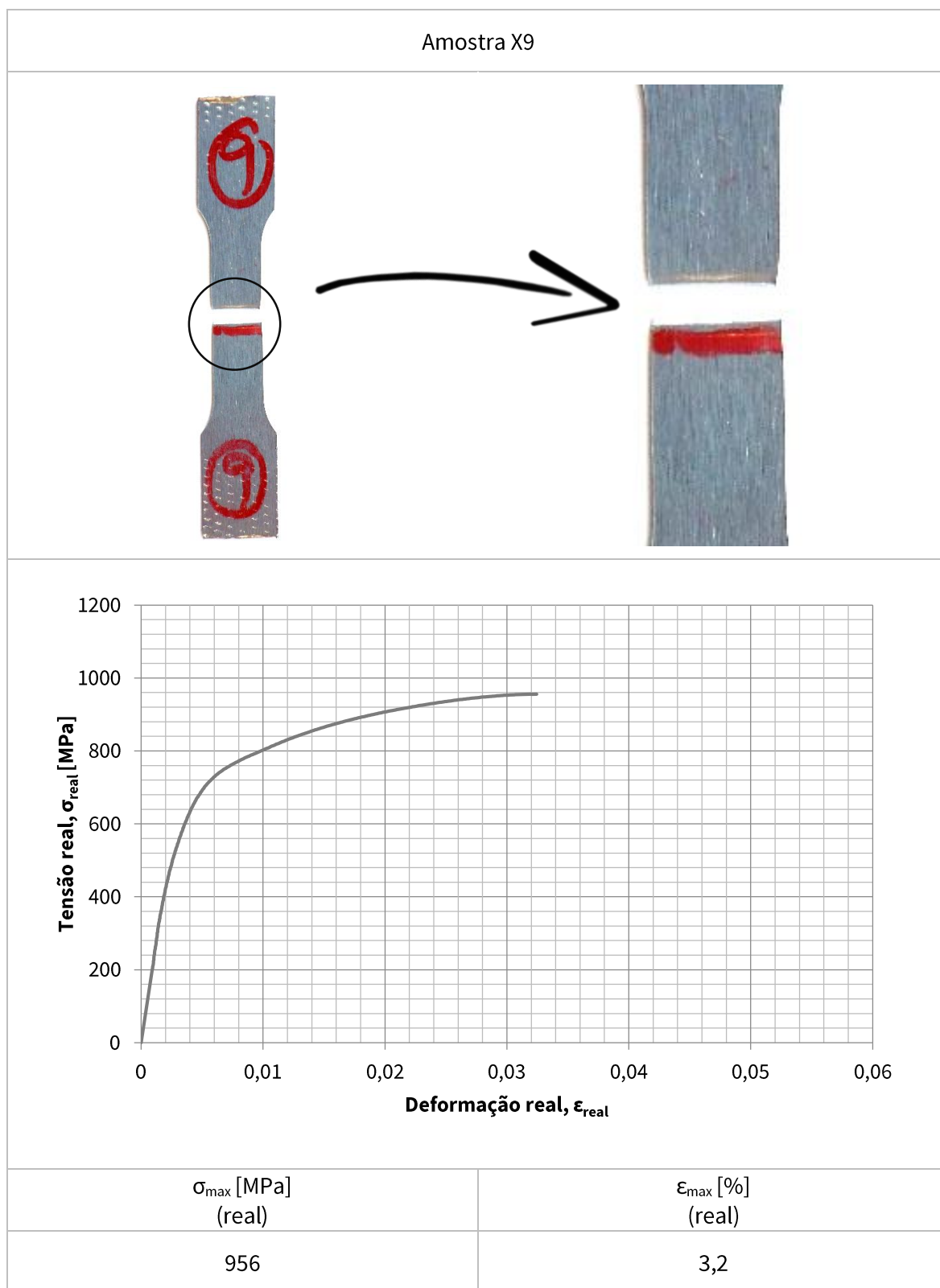
Tabela 46 - Resultados do ensaio de tração da amostra X8





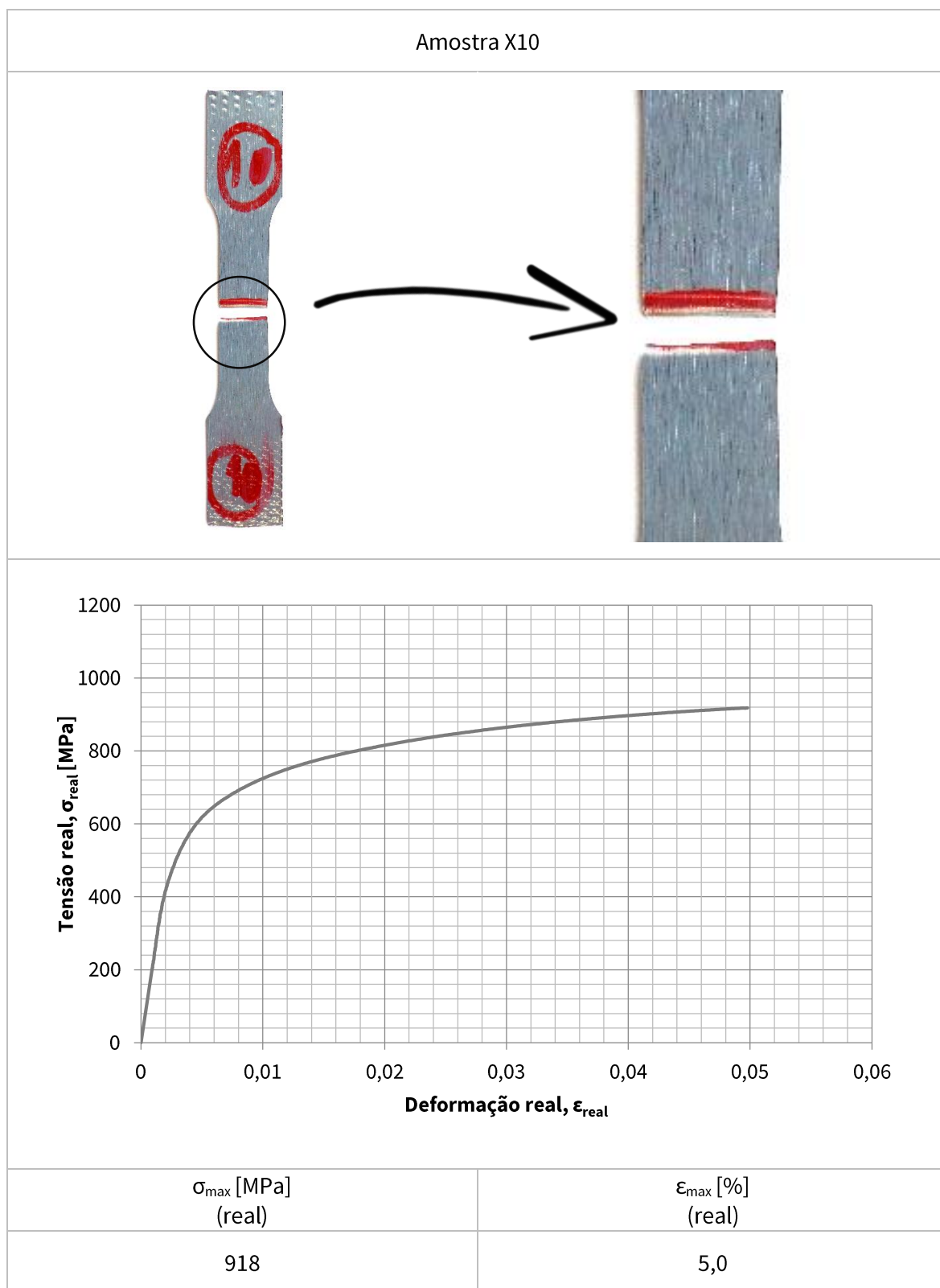
Os resultados do ensaio de tração da amostra X9 estão representados na Tabela 47.

Tabela 47 - Resultados do ensaio de tração da amostra X9



Os resultados do ensaio de tração da amostra X10 estão representados na Tabela 48.

*Tabela 48 - Resultados do ensaio de tração da amostra X10*



O Gráfico 2 apresenta o resumo dos valores de tensão real obtidos em todas as amostras.

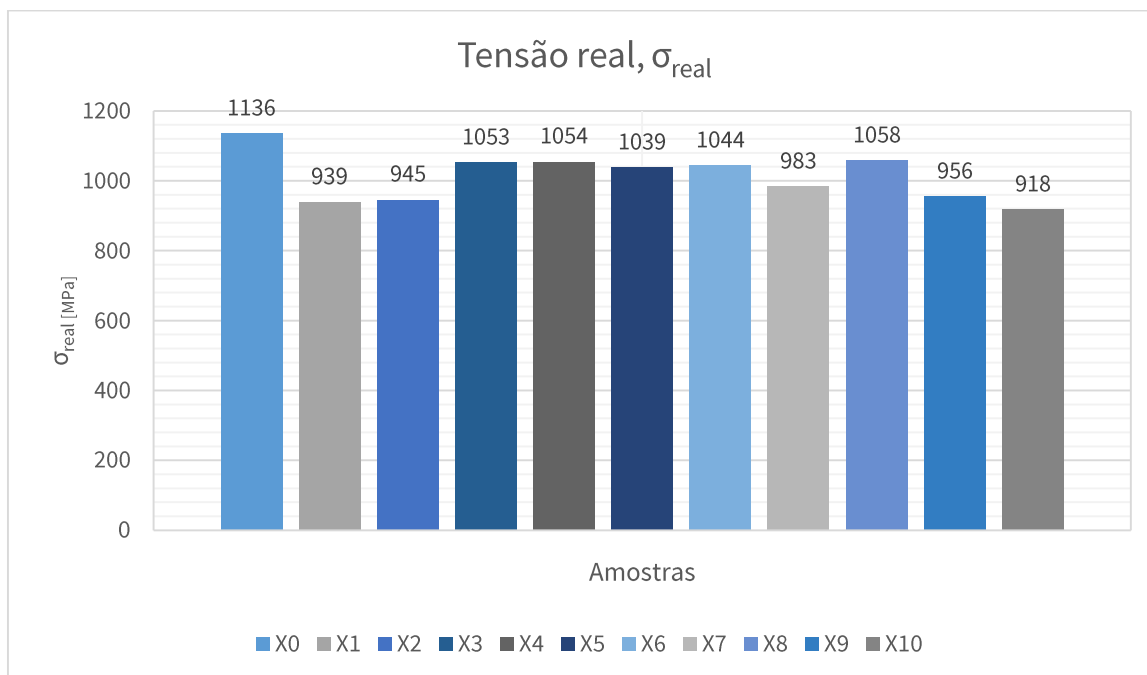


Gráfico 2 - Resumo da tensão real obtida em todas as amostras

O Gráfico 3 apresenta o resumo dos valores de deformação real obtidos em todas as amostras.

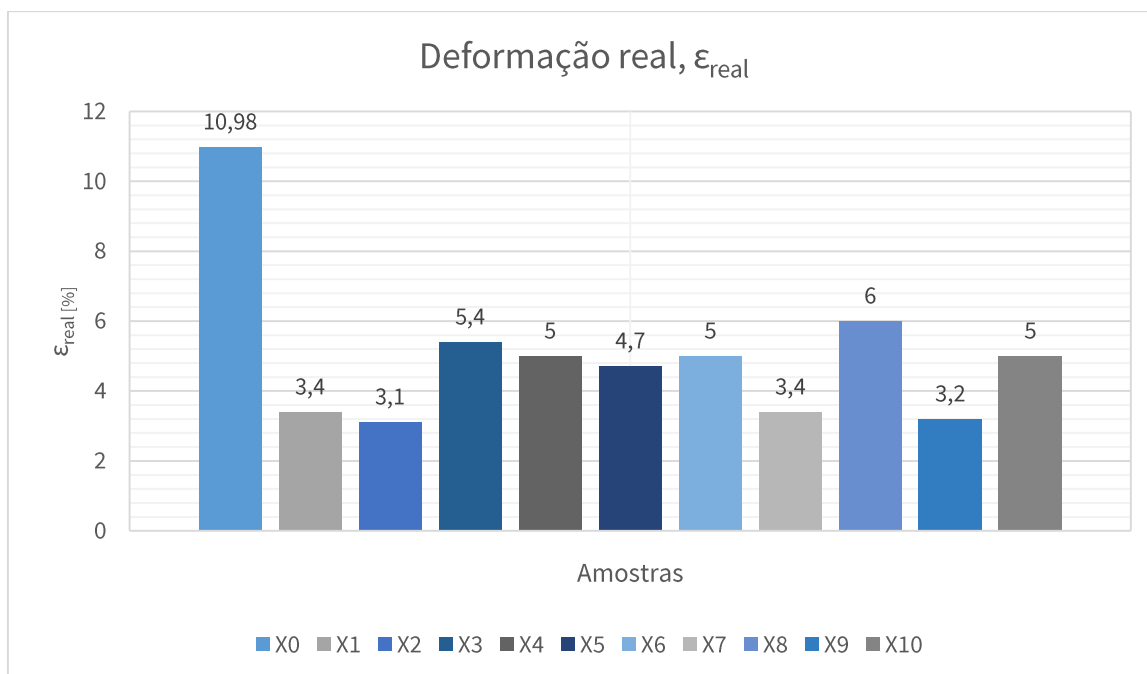



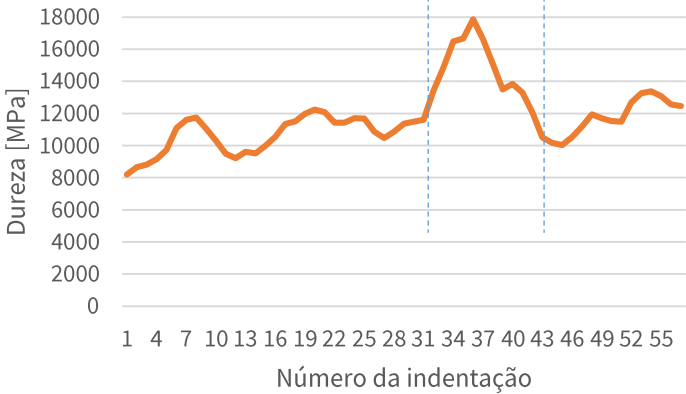
Gráfico 3 - Resumo da deformação real obtida em todas as amostras

Os gráficos revelam que a amostra X8 é a mais promissora entre as restantes pois é aquela cujas propriedades mais se aproximam da amostra X0 (amostra base sem soldadura).

## 4.2.2. Medição de microdurezas

Os resultados da medição de microdurezas por nanoindentação da amostra X8 estão representados na Tabela 49.

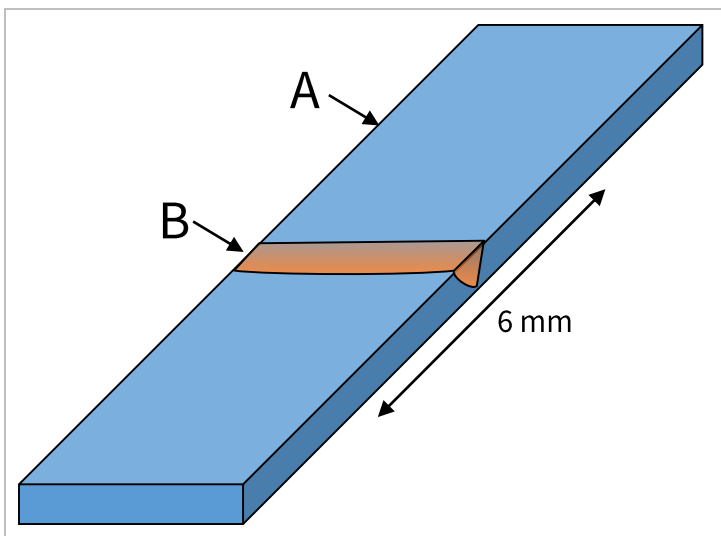
Tabela 49 - Resultados da medição de microdurezas por nanoindentação

Legenda	Representação gráfica
<p>A – material base B – zona soldada</p>	
<p>Gráfico 4 - Dureza de amostra</p>	

Através dos resultados obtidos é facilmente perceptível que existe um aumento de dureza na zona soldada. É também visível através do Gráfico 4 que existe uma depressão entre a zona soldada e o material base. Pensa-se que esta zona possa ser a zona termicamente afetada pois foi nesta zona que as amostras dos ensaios de tração partiram. De facto, o artigo[61], num estudo de soldabilidade de vários aços DP, verifica que apenas o mais resistente, o DP980, apresenta este amaciamento na ZTA (*softning*).

A média das microdurezas medidas do material base e da zona soldada estão representadas na Tabela 50. Para obter a média destas zonas, considerou-se o material base da indentação 1 até à indentação 31 e a zona soldada da indentação 32 à 43.

Tabela 50 - Média dos resultados da medição de microdurezas

	Dureza [GPa]	A = 10,7 (do ponto 1 ao 31)
		B = 14,5 (do ponto 32 ao 43)

Os resultados de nanoindentação são expressos na unidade de GPa. Porém, uma vez que grande parte das durezas é exibida na unidade de *Vickers*, pretende-se converter os valores alcançados em GPa para *Vickers*.

Contudo, a conversão de nanodureza *Berkovick* para *Vickers* não é linear e não obedece a nenhuma regra específica. Para engendrar esta conversão fez-se o seguinte:

- Mediu-se a microdureza de uma amostra numa máquina convencional de medição de microdurezas em *Vickers*;
- Usou-se a conversão de GPa em *Vickers* de um artigo científico [62] para converter os valores obtidos neste trabalho;
- Finalmente, compararam-se os resultados obtidos por estes dois métodos e analisou-se a fiabilidade destes dois métodos.

A Tabela 51 apresenta os resultados de microdureza obtidos através da máquina convencional de medição de microdurezas *Vickers*.

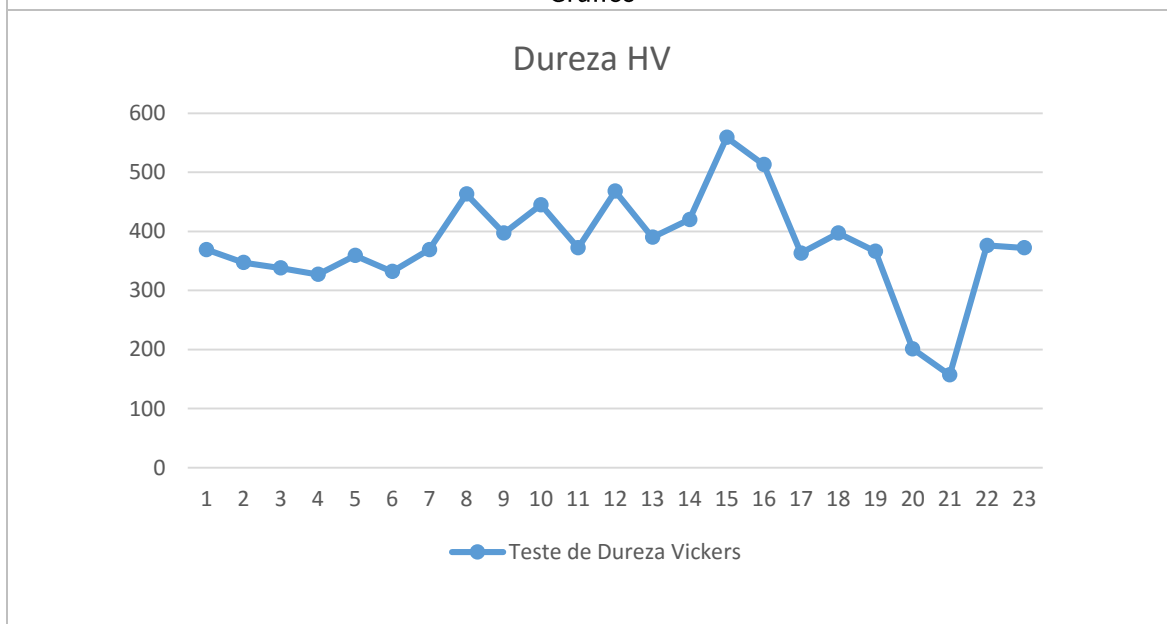
A Tabela 52 apresenta os resultados através da conversão utilizada num artigo científico [62].



Tabela 51 - Resultados da medição das microdurezas em Vickers

Resultados da medição de microdurezas em Vickers	
Pontos	Dureza [HV]
1	369
2	347
3	338
4	327
5	359
6	332
7	369
8	463
9	397
10	445
11	372
12	468
13	390
14	420
15	559
16	513
17	363
18	397
19	366
20	201
21	157
22	376
23	372

Gráfico



Resultados médios

Metal Base (Ponto 1 ao 12)	Zona Soldada (Ponto 13 ao 17)
$X_A=382$ HV	$X_B=449$ HV

Tabela 52 - Relação entre a dureza medida em GPa na nanoindentação e em Vickers

Relação entre a dureza medida em GPa (nanoindentação) e em Vickers	
Resultados do artigo [62]	
Dureza medida em Vickers (X)	Dureza medida em GPa (Y)
303	5.2
316	5.5
336	6.6
311	5.1
314	4.9
303	4.8
313	5.1
290	4.2
Gráfico	
<p>Relação entre Nanoindentação e Vickers</p> <p>● Resultados ● Regressão Linear</p>	
Dados sobre a regressão linear	
$R^2 = 0,93$	$Y = 0,048356 \times X - 9,85152$
Conversão dos valores do teste de nanoindentação de GPa para Vickers	
$Y_A = 10,7 \text{ GPa}$	$X_A = 425 \text{ HV}$
$Y_B = 14,5 \text{ GPa}$	$X_B = 504 \text{ HV}$

A Tabela 53 faz a comparação entre os dois métodos.

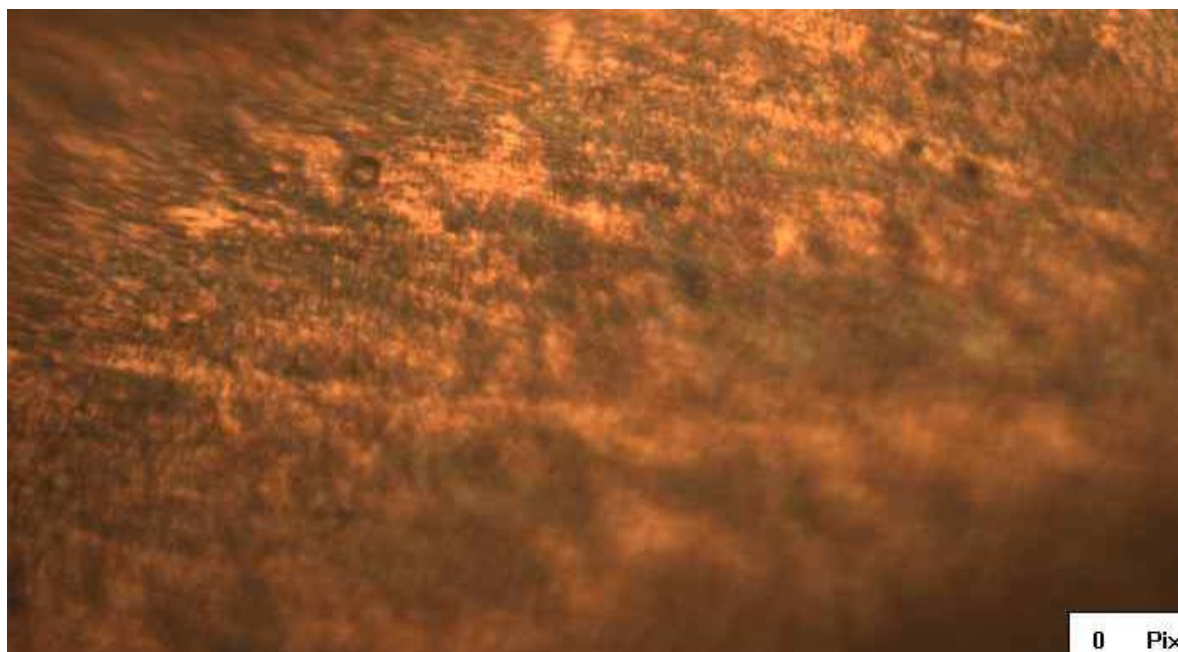
Tabela 53 - Comparação dos resultados de microdurezas dos dois métodos

	Comparação entre os dois métodos	
	Nanoindentação	Vickers
Metal Base	$X_A = 425 \text{ HV}$	$X_A = 382 \text{ HV}$
Zona Soldada	$X_B = 504 \text{ HV}$	$X_B = 449 \text{ HV}$

Os resultados obtidos pelos dois métodos são apenas ligeiramente diferentes. No entanto, em ambos os casos existe um aumento de dureza na zona soldada e um amaciamento de dureza imediatamente ao lado da zona soldada.

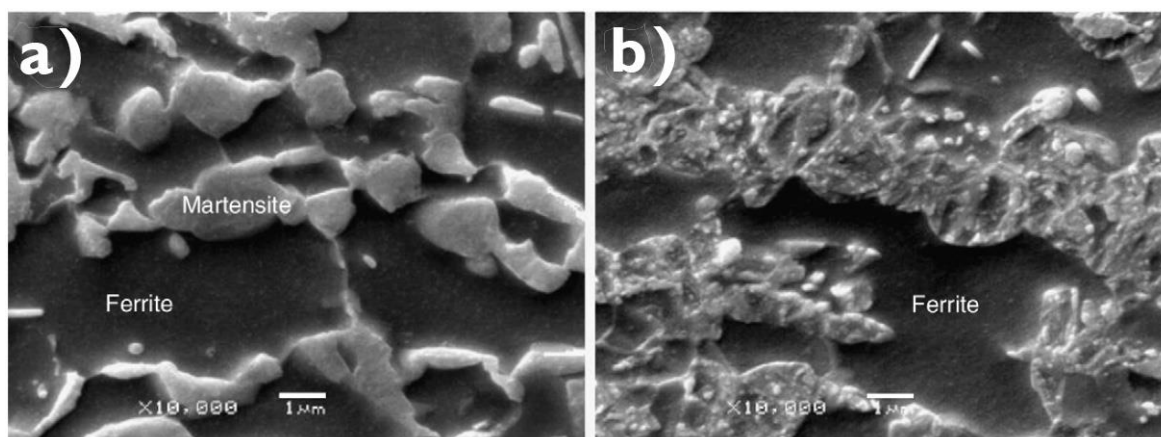
### 4.2.3. Análise da microestrutura

Depois de devidamente tratadas, as amostras foram observadas ao microscópio ótico com o objetivo de identificar os seus grãos. A Figura 111 mostra uma tentativa de visualização dos grãos de uma amostra com a ampliação máxima (50x) de um microscópio ótico.



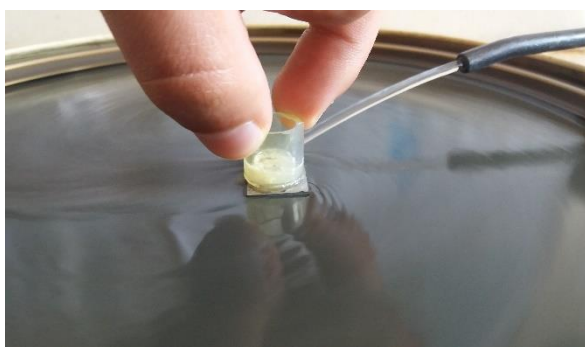
*Figura 111 - Tentativa de observar os grãos da amostra na resolução máxima do microscópio ótico*

A figura acima deixa bem claro que não é possível identificar os grãos da amostra com recurso ao microscópio ótico. De acordo com o artigo [63], a dimensão dos grãos do aço DP980 situa-se na escala de poucos micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) [63] [64], como se pode ver na Figura 112.



*Figura 112 – Micrografias SEM do material base (a) e da zona termicamente afetada (b) do aço DP980 [63]*

Considerando que o aço DP1000 se deve assemelhar bastante ao aço DP980, concluiu-se que os grãos não são observáveis por microscopia ótica. As amostras foram assim tratadas para posteriormente serem observadas num microscópio eletrónico (SEM). Para isso, fez-se primeiro um polimento convencional com lixas de granulometria 500 e 1200 (Figura 113) e depois fez-se um polimento eletrolítico (Figura 114). Esta última etapa consiste na dissolução eletroquímica da superfície do metal resultando numa superfície plana, polida e perfeitamente preparada para a observação ao microscópio.



*Figura 113 – Polimento convencional*



*Figura 114 – Polimento eletrolítico na máquina Struers LectroPol-5*

Por fim, utilizou-se o microscópio eletrónico (SEM) (Figura 115 e Figura 116) para observar a microestrutura das amostras.



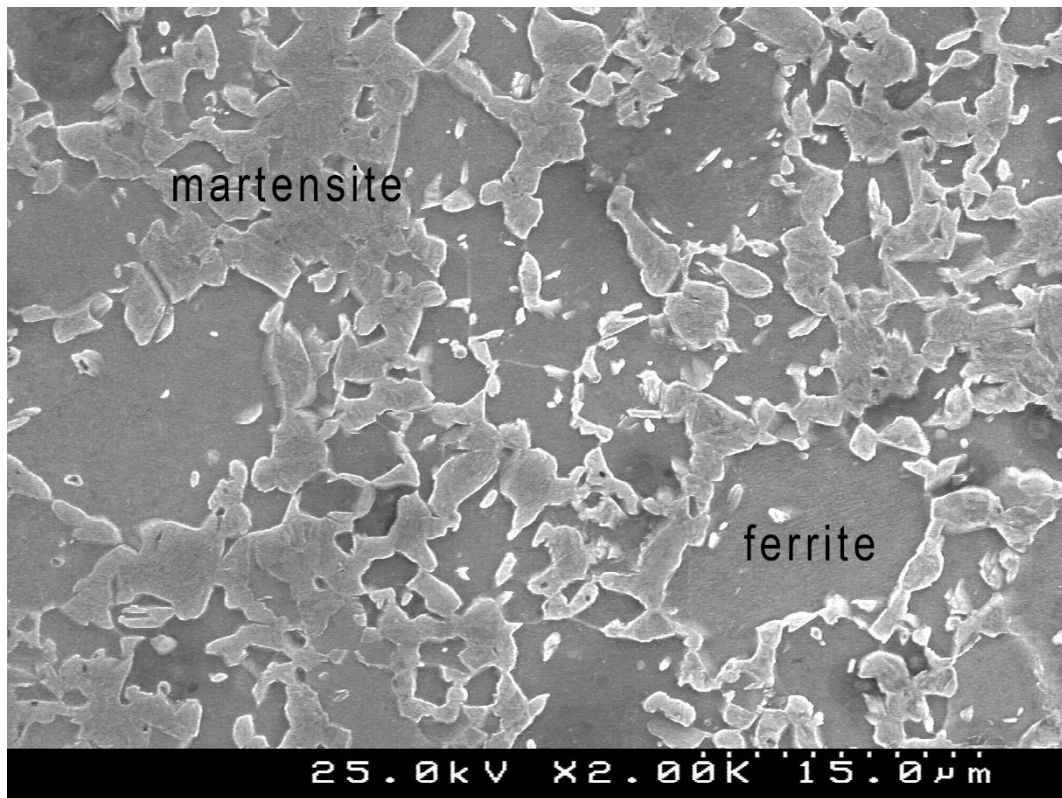
*Figura 115 – Microscópio eletrónico (SEM)*



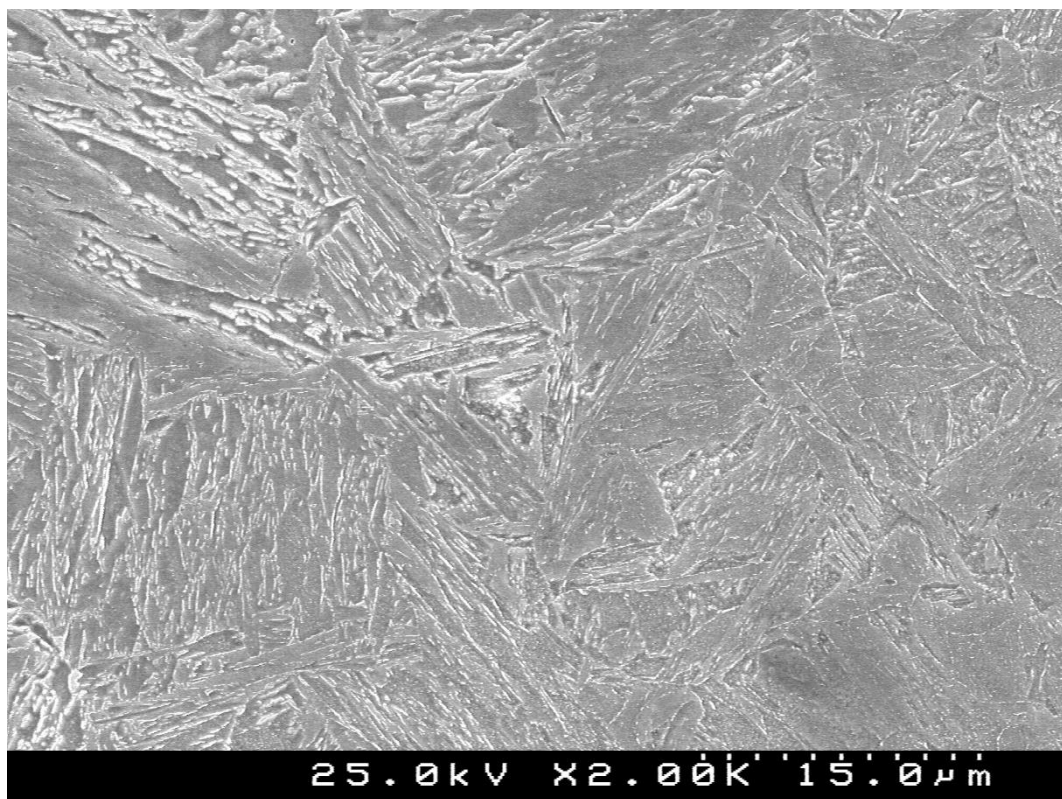
*Figura 116 – Microscópio*

O microscópio permitiu obter os resultados apresentados na Figura 117, Figura 118 e Figura 119.

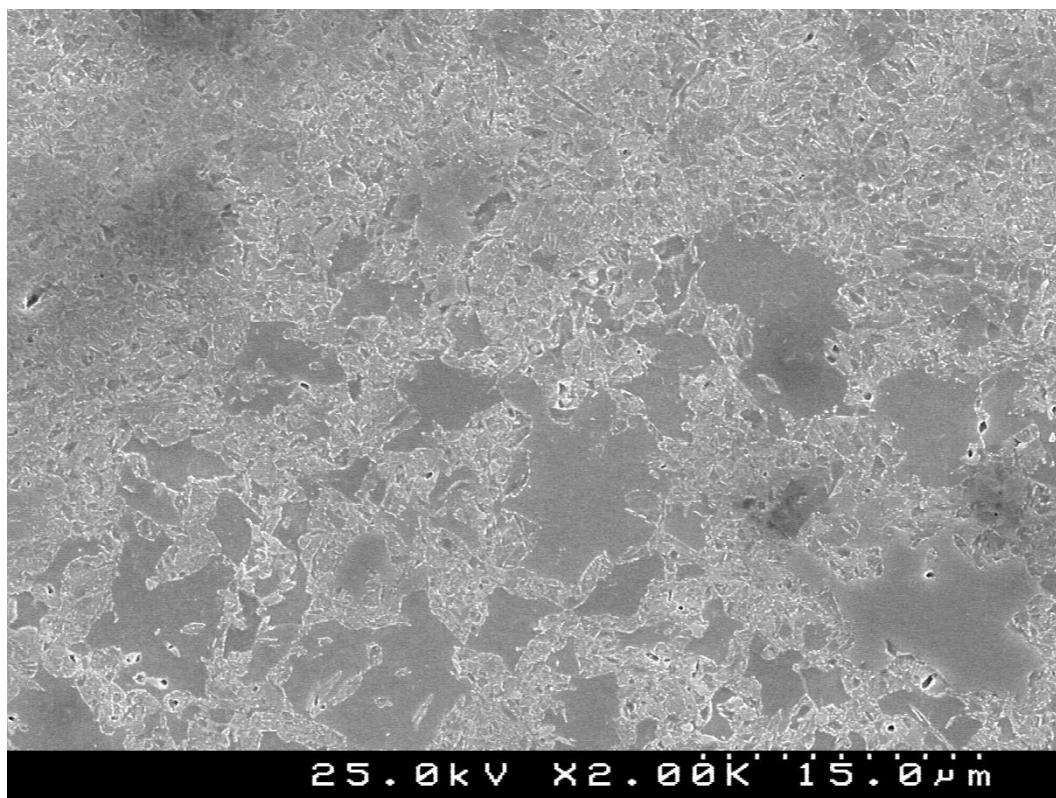




*Figura 117 - Material base*



*Figura 118 - Zona soldada (microestrutura acicular) [65]*



*Figura 119 - Zona de transição*


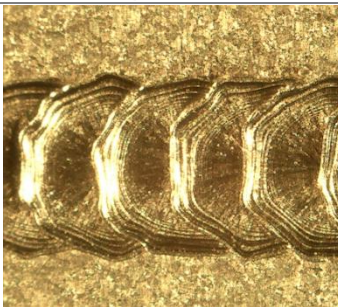

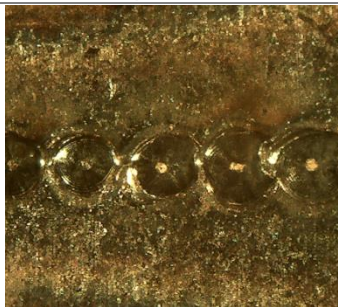

As imagens obtidas pelo microscópio eletrónico vêm explicar o motivo pelo qual a zona mais frágil da amostra é a que se encontra imediatamente ao lado do cordão de soldadura. Inicialmente, pensou-se que os provetes partiam pela zona termicamente afetada e que isto se devia por esta zona ter um grão maior, resultado do aquecimento da peça durante o processo de soldadura. Todavia, as imagens obtidas pelo microscópio eletrónico mostram que não existe uma diferença significativa no tamanho do grão entre a zona termicamente afetada e o material base. Existe sim, uma grande diferença entre a microestrutura do material base e da zona soldada. Existe quase como uma linha que separa estes dois meios e não é perceptível qualquer zona de transição. Isto acontece, pois, a soldadura laser é muito localizada, ou seja, aplica calor apenas num ponto e não numa grande superfície. Nesta zona de interface crê-se que exista uma grande acumulação de tensões devido ao processo de soldadura e aos ensaios de tração e que, portanto, isso defina a fragilidade dessa zona.

Para descobrir os parâmetros ótimos de soldadura do aço *dual-phase* 1000 de 1 mm de espessura soldaram-se várias amostras, fizeram-se ensaios de tração, mediram-se microdurezas e ainda se fez uma breve análise da microestrutura. Estas etapas permitiram averiguar se os parâmetros utilizados conferem boas características a este aço.



A Tabela 54 mostra imagens da soldadura realizada pelos parâmetros ótimos.

*Tabela 54 - Imagens da soldadura realizada pelos parâmetros ótimos*

Amostra	Soldadura parte superior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte superior (microscópio – zoom 15x)	Soldadura parte inferior (câmara - zoom 2.2x)	Soldadura parte inferior (microscópio – zoom 15x)	Penetração da soldadura (microscópio – zoom 15x)
X8					

A Tabela 55 mostra os parâmetros ótimos para a soldadura do aço DP1000 de 1 mm de espessura.

*Tabela 55 - Parâmetros ótimos para a soldadura do aço DP1000 de 1 mm de espessura*

DP1000	Parâmetros ótimos										
	Amostra	Potência [%]	Duração Pulso [ms]	Sobreposição [%]	Diâmetro [mm]	Tipo de pulso	Energia [ J ]	Velocidade [mm/s]	Velocidade máxima nesta configuração [mm/s]	Distância do laser ao material a soldar [mm]	Caudal do gás [l/min]
	X8	57	9,0	60	0,6	simples retangular	45,0	0,3	1,2	105	10



# 5.

## Conclusões

*‘If opportunity doesn’t knock, build a door.’*

Milton Berle

---

**Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho de investigação.**

O presente trabalho estudou, experimentalmente, a influência dos parâmetros laser na penetração da soldadura do aço DP1000 e determinou quais os parâmetros mais aconselhados para soldar este mesmo material. Esta investigação permite concluir o seguinte:

- I. A penetração da soldadura aumenta com a potência do feixe laser. Quanto maior a potência maior a penetração e vice-versa;
- II. A penetração da soldadura aumenta com a duração do pulso. Quanto maior a duração do pulso maior a penetração e vice-versa;
- III. A sobreposição não afeta a penetração máxima da soldadura até valores de 80%. No entanto, uma penetração de 95% atravessa por completo o material;
- IV. A penetração da soldadura diminui com o aumento do diâmetro do feixe laser. Quanto maior o diâmetro do feixe menor a penetração e vice-versa;
- V. Com exceção do pulso “escala expandida”, os diferentes tipos de pulso possuem apenas ligeiras diferenças entre si na penetração da soldadura;
- VI. A penetração da soldadura não é constante ao longo do cordão de soldadura. Tende a existir uma maior diferença entre a penetração inicial e final da soldadura quanto mais energia for aplicada no material;
- VII. A penetração da soldadura aumenta com a velocidade de soldadura. Quanto maior a velocidade maior a penetração e vice-versa;

- VIII. Os ensaios de tração revelam que a parte mais fraca da soldadura é a zona de separação entre o material base e a zona soldada;
- IX. Os ensaios de dureza evidenciam um aumento de dureza na zona soldada;
- X. A observação das amostras no microscópio eletrónico (SEM) revela que a principal causa da fragilidade instalada na zona imediatamente ao lado da soldadura é provocada pela acumulação de tensões que se instala entre o material base e a zona soldada resultantes do processo de soldadura e dos ensaios de tração. Não se visualiza nenhuma alteração no tamanho do grão ao lado da zona soldada.

As conclusões retiradas desta investigação são válidas para as condições (laser, material, etc) na qual o trabalho experimental foi elaborado. Estas conclusões, são diferentes das de alguns artigos o que significa que não se devem considerar estas conclusões como máximas para todos os materiais.

# 6.

## Trabalho futuro

*‘This is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is, perhaps, the end of the beginning.’*

Winston Churchill

---

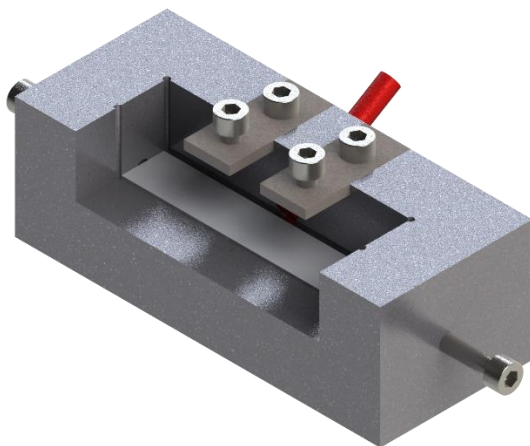
Como diria Winston Churchill, este trabalho é apenas o fim do início, o que significa que, apesar desta dissertação se tenha revelado satisfatória na aquisição de novo conhecimento, ainda há, e haverá sempre, trabalho a fazer.

Como tal, sugere-se o seguinte trabalho futuro:

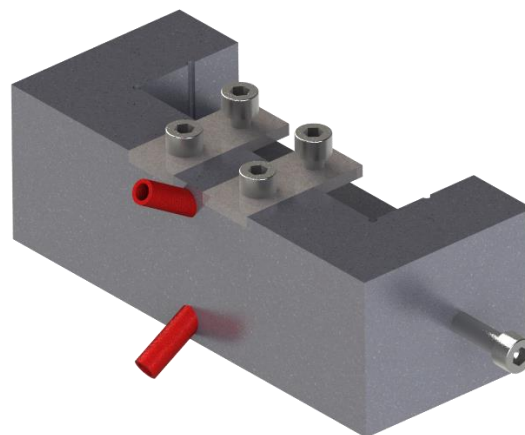
- I. Estudar a influência dos parâmetros de soldadura na resistência mecânica do material;
- II. Avaliar a influência da distância do laser à peça na penetração da soldadura;
- III. Avaliar a influência do caudal do gás na penetração da soldadura;
- IV. Avaliar a influência de diferentes gases na penetração da soldadura;
- V. Utilizar metal de adição na soldadura laser;
- VI. Executar uma análise por raios X para identificar possíveis defeitos internos da soldadura;
- VII. Fazer o mesmo estudo de parâmetros de soldadura para outros aços *dual-phase* (DP300, DP350, ..., DP980) e outros materiais;
- VIII. Criar um modelo matemático para prever a penetração da soldadura para determinados parâmetros de soldadura;
- IX. Elaborar um *software* que reúna os parâmetros de soldadura laser ideais para determinados materiais e condições;
- X. Melhoria do dispositivo de fixação de forma a que este proteja a soldadura da parte superior e inferior. Na página que se segue faz-se uma sugestão para esta melhoria.



A Figura 120 e Figura 121 mostram uma sugestão de melhoria do dispositivo de fixação.

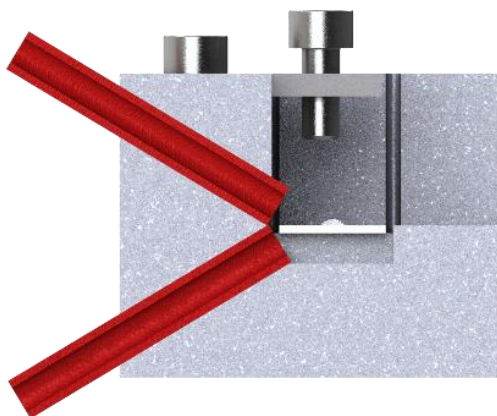


*Figura 120 – Modificação no dispositivo de fixação*

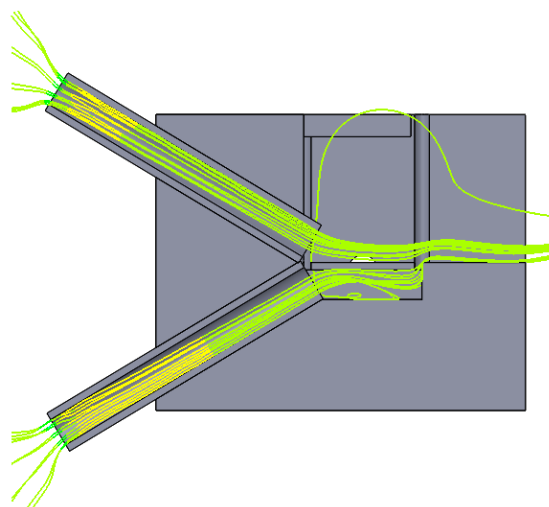


*Figura 121 – Modificação no dispositivo de fixação*

A Figura 122 e Figura 123 mostram a orientação dos tubos de alimentação do gás e uma simulação de fluídos que demonstra a eficácia deste sistema em proteger o cordão de soldadura superior e inferior.



*Figura 122 – Orientação dos tubos que conduzem o gás*



*Figura 123 – Simulação da trajetória do gás*

## Referências bibliográficas

---

- [1] “Green Car Congress: European Parliament Votes for 125g/km CO<sub>2</sub> Limits for New Vehicles by 2015.” [Internet]. Disponível em: <http://www.greencarcongress.com/2007/10/european-parlia.html>. [Acedido em: 01-Março-2016].
- [2] M. A. Wolff, R. F. da Silva, and L. O. Vilarinho, “Determinação dos campos de soldabilidade para o aço Dual-Phase 600 em equipamentos de soldagem a ponto AC e MFDC,” *Soldag. Inspeção*, vol. 15, Sep. 2010.
- [3] M. Marya and X. Q. Gayden, “Development of Requirements for Resistance Spot Welding Dual -Phase (DP600) Steels Part1- The Causes of Interfacial Fracture,” *Weld. J.*, vol. 84, no. Novembro, 2005.
- [4] C. A. Walsh, “LASER WELDING - Literature Review,” no. Julho, 2002.
- [5] J. R. V. Fogaça, “Luz solar e a radiação ultravioleta. Radiações de luz solar - Mundo Educação.” [Internet]. Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/luz-solar-radiacao-ultravioleta.htm>. [Acedido em: 10-Maio-2016].
- [6] C. Dawes, *Laser Welding: A Practical Guide*. Woodhead Publishing, 1992.
- [7] “comprimento de onda formula - Pesquisa Google.” [Internet]. Disponível em: [https://www.google.pt/search?q=comprimento+de+onda&espv=2&biw=1440&bih=799&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjeifOTts\\_MAhXEpx4KHVcDDCoQ\\_AUIBigB&dpr=1#tbm=isch&q=comprimento+de+onda+formula&imgsrc=6WIGmayjsBTyTM%3A](https://www.google.pt/search?q=comprimento+de+onda&espv=2&biw=1440&bih=799&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjeifOTts_MAhXEpx4KHVcDDCoQ_AUIBigB&dpr=1#tbm=isch&q=comprimento+de+onda+formula&imgsrc=6WIGmayjsBTyTM%3A). [Acedido em: 10-Maio-2016].
- [8] “comprimento de onda - Pesquisa Google.” [Internet]. Disponível em: [https://www.google.pt/search?q=comprimento+de+onda&espv=2&biw=1440&bih=799&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjeifOTts\\_MAhXEpx4KHVcDDCoQ\\_AUIBigB&dpr=1#imgsrc=tkY2RA49WBHXLm%3A](https://www.google.pt/search?q=comprimento+de+onda&espv=2&biw=1440&bih=799&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjeifOTts_MAhXEpx4KHVcDDCoQ_AUIBigB&dpr=1#imgsrc=tkY2RA49WBHXLm%3A). [Acedido em: 10-Maio-2016].
- [9] P. Maia, J. Vilas, Q. Sa, E. Alfredo, B. Orientador, and A. F. Faculdade, “Otimização de

- Parâmetros em Soldadura Laser Quantal SA,” 2013.
- [10] D. Oliveira, “Parâmetros da soldadura LASER pulsado de Nd:YAG em aços avançados de alta resistência,” Universidade de Aveiro, 2015.
- [11] M. Plank, A. Einstein, and C. Townes, “A Brief History of Lasers,” 1950.
- [12] “10 lições de vida retiradas de célebres frases de Albert Einstein - greenMe.com.br.” [Internet]. Disponível em: <https://www.greenme.com.br/viver/costume-e-sociedade/2696-10-lico-es-de-vida-retiradas-frases-albert-einstein>. [Acedido em: 11-May-2016].
- [13] “Max Planck - Entdecker der Quantentheorie.” [Internet]. Disponível em: <http://www.ndr.de/kultur/geschichte/koepfe/Max-Planck-Entdecker-der-Quantentheorie,maxplanck2.html>. [Acedido em: 11-Maio-2016].
- [14] “History of Lasers - WorldOfLasers.com.” [Internet]. Disponível em: <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>. [Acedido em: 11-Maio-2016].
- [15] “Retrobituaries: Theodore Maiman, Inventor of the Laser | Mental Floss.” [Internet]. Disponível em: <http://mentalfloss.com/article/50562/retrobituaries-theodore-maiman-inventor-laser>. [Acedido em: 11-Maio-2016].
- [16] “LaserFest | The First Ruby Laser.” [Internet]. Disponível em: <http://www.laserfest.org/lasers/how/ruby.cfm>. [Acedido em: 11-Maio-2016].
- [17] T. Werkzeugmaschinen GmbH + Co.KG, “Laser machining Solid-state lasers,” 2007.
- [18] “Free-Electron Lasers and Conventional Lasers.” [Internet]. Disponível em: [http://photon-science.desy.de/facilities/flash/the\\_free\\_electron\\_laser/how\\_it\\_works/lasers/index\\_eng.html](http://photon-science.desy.de/facilities/flash/the_free_electron_laser/how_it_works/lasers/index_eng.html). [Acedido em: 11-Maio-2016].
- [19] W. M. Steen, *Laser Material Processing*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [20] “Constituição do átomo.” [Internet]. Disponível em: <http://www.explicatorium.com/cfq-9/constituicao-do-atomo.html>. [Acedido em: 11-Maio-2016].
- [21] “átomo 3d - Pesquisa Google.” [Internet]. Disponível em: [https://www.google.pt/search?q=%C3%A1tomo&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiLg6KzjNDMAhUG9R4KHS AKD6IQ\\_AUIBygB&biw=1440&bih=755#tbm=isch&q=%C3%A1tomo](https://www.google.pt/search?q=%C3%A1tomo&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiLg6KzjNDMAhUG9R4KHS AKD6IQ_AUIBygB&biw=1440&bih=755#tbm=isch&q=%C3%A1tomo)

- 3%A1tomo+3d&imgsrc=Jq4WUr1VUX7d1M%3A. [Acedido em: 10-Maio-2016].
- [22] Unitek Miyachi Corporation, “Nd : YAG Laser Welding Guide,” 2003.
- [23] T. Werkzeugmaschinen GmbH + Co.KG, “Laser machining Solid-state lasers,” *Laser Mach. Solid-state lasers*, 2007.
- [24] A. Bastos, *Apontamentos de Tecnologia de Processos de Ligação*. 2014.
- [25] L. W. Process, “Laser Welding 10.1,” 2008.
- [26] D. C. Dumitras, “Pulsed Laser Welding, Nd:YAG laser,” 2012.
- [27] V. Chiaverini, “Outros processos de conformação mecânica,” *Tecnologia Mecânica vol. II: Processos de Fabricação e Tratamento*. 1986.
- [28] K. Weman, “Pressure welding methods,” *Welding Processes Handbook*. 2003.
- [29] A. A. Gorni, “Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas,” *Corte Conform. Met.*, 2008.
- [30] H. Davy and H. C. Oesterd, “Revisão Bibliográfica,” 2004.
- [31] U. Federal, D. O. Rio, G. Do, S. U. L. Faculdade, N. Econ, N. Cont, and V. I. A. R. D. E. Pre, “Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul,” 2012.
- [32] I. Cáceres Leite Rocha, “Propriedades Mecânico/Metalúrgicas de juntas soldadas de DP1000 e o efeito de bake hardening,” *Escola de Engenharia*, 2014.
- [33] C. Phase, “Revisão Bibliográfica.”
- [34] Y. Granbom, *Structure and mechanical properties of dual phase steels – An experimental and theoretical analysis*. 2010.
- [35] “INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO COMPORTAMENTO À FADIGA DO AÇO DP600 Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica,” 2007.
- [36] W. STEEL, “Dual Phase.” [Internet]. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/>.
- [37] <http://www.thefabricator.com/author/daniel-j-schaeffler>, “The unique characteristics of dual-phase steels,” Maio 2015.

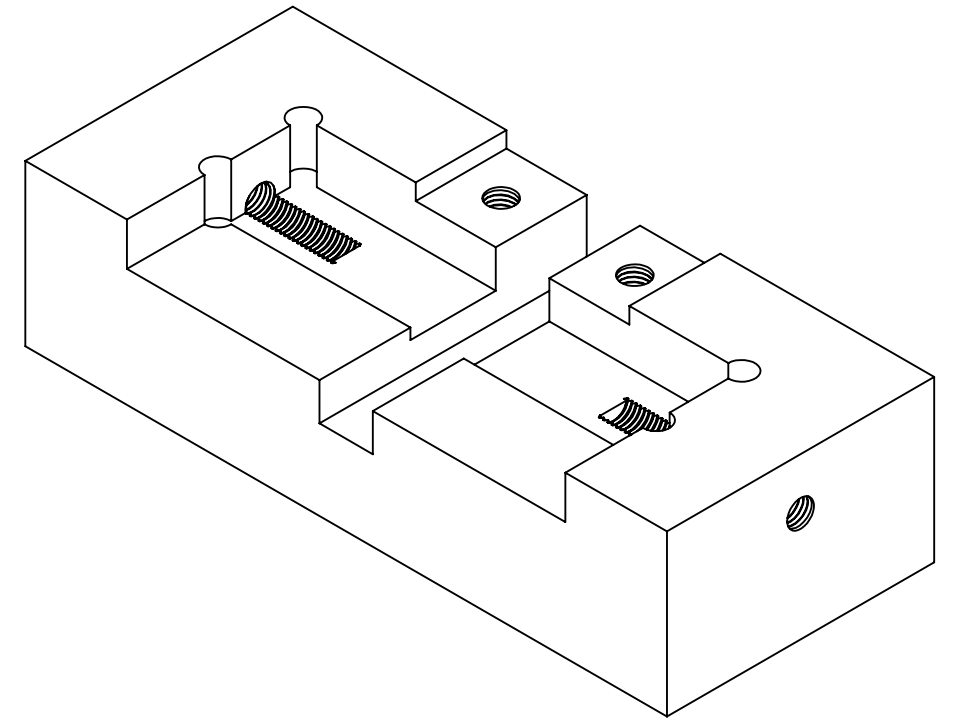
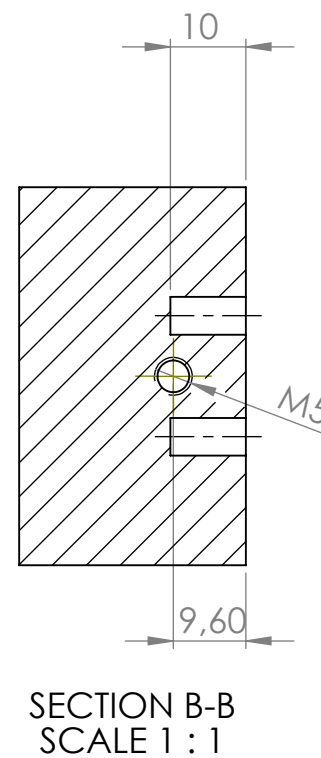
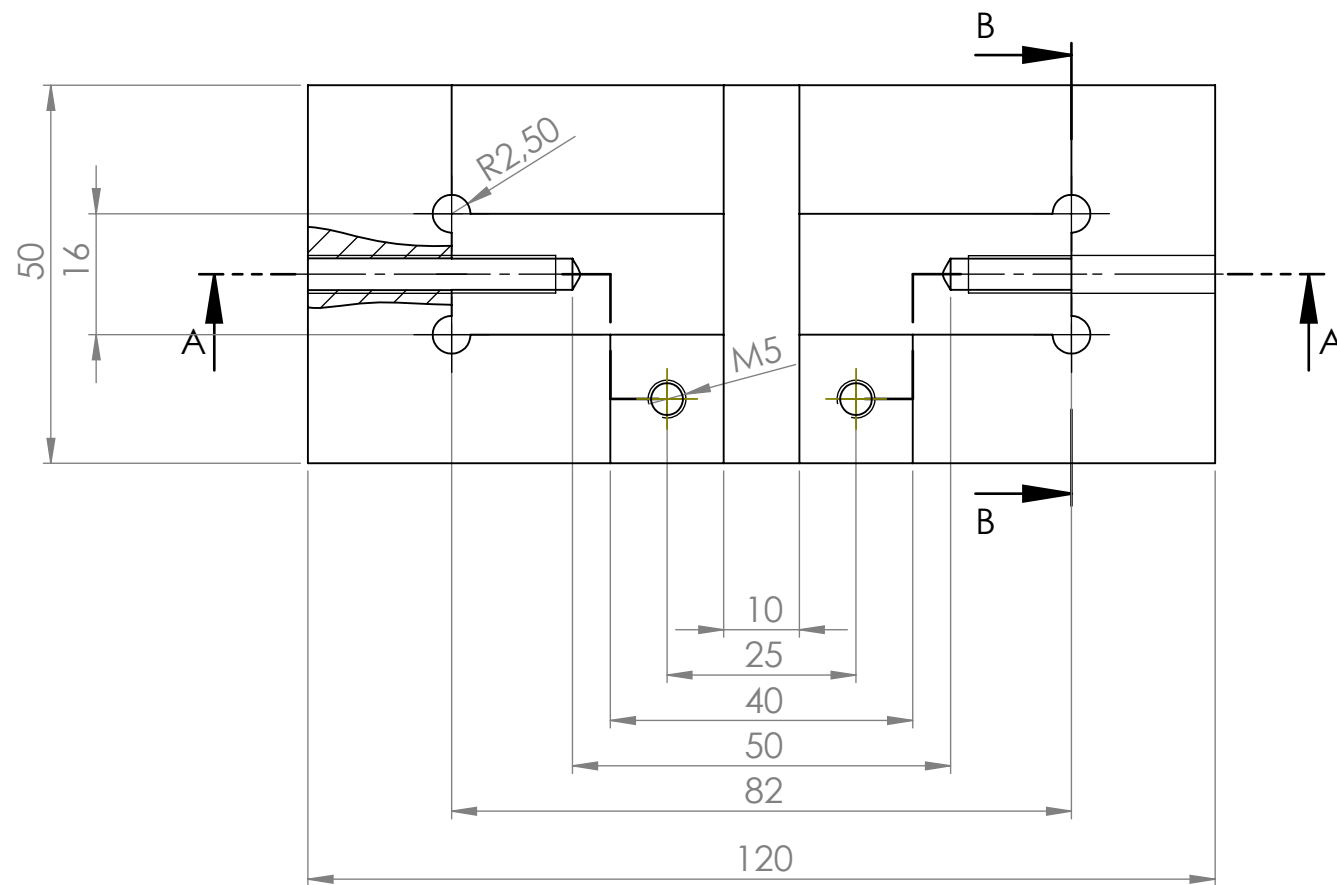
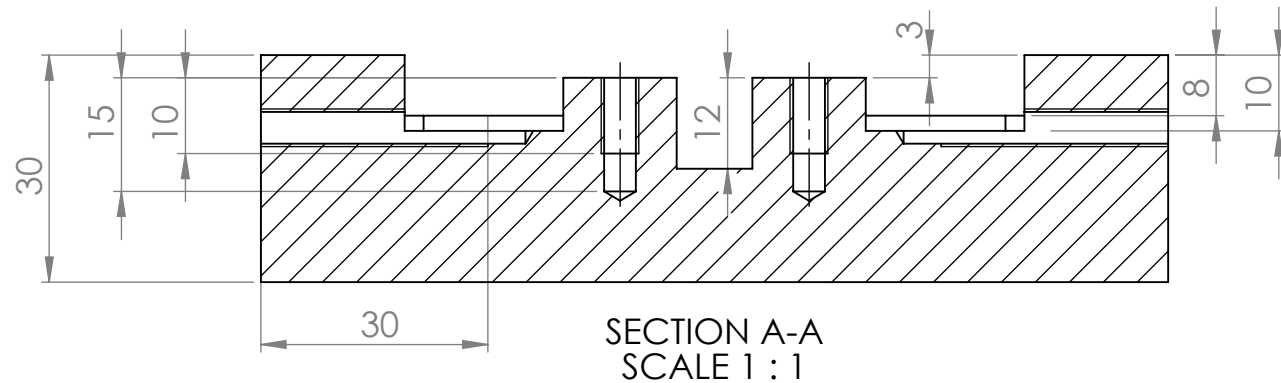
- [38] I. Rocha, I. Machado, and C. Mazzaferro, “Mechanical and metallurgical properties of DP 1000 steel square butt welded joints with GMAW,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 4, 2014.
- [39] H. Chmelíckova and H. Šebestová, “Pulsed Laser Welding,” *Intechopen*.
- [40] A. Khourshid and T. Sharef, “Effect of Laser Beam Welding Parameters on Microstructure and Properties of Duplex Stainless Steel,” 2011.
- [41] K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, and M. S. J. Hashmi, “Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile,” vol. 165, 2005.
- [42] G. V. da Silveira, “Efeito da alteração dos parâmetros do processo laser sobre a geometria do cordão de solda,” 2012.
- [43] D. C. Saha, D. Westerbaan, S. S. Nayak, E. Biro, A. P. Gerlich, and Y. Zhou, “Microstructure-properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 607, 2014.
- [44] I. C. L. Rocha, “Propriedades mecânico/metalúrgicas de juntas soldadas de DP1000 e o efeito de bake hardening,” vol. 1, 2014.
- [45] W. A. de Moraes and H. C. Borges, “Adequações Nas Práticas Dos Novos Processos De Corte E Dobra Para Otimizar O Desempenho De Aços Planos,” *Tecnol. em Metal. e Mater.*, vol. 7, 2010.
- [46] Sisma, “Swa 150 Swa 300,” *Sisma*, 2014.
- [47] P. R. Vicenza, “Swa 150-300.”
- [48] R. A. Rohde, “Metalografia preparação de amostras,” 2010.
- [49] “Análise Metalografia de Metais.” [Internet]. Disponível em: <http://www.webartigos.com/artigos/analise-metalografia-de-metais/57232/>. [Acedido em: 03-Março-2016].
- [50] “03 - Propriedades Mecânicas dos aços-carbono | Aços-carbono e Aços-liga | Aços e Ferros Fundidos | Aços & Ligas | Infomet.” [Internet]. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=6>. [Acedido em: 04-Maio-2016].

- [51] “Retífica – Wikipédia, a enciclopédia livre.” [Internet]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ret%C3%ADfica>. [Acedido em: 13-Abril-2016].
- [52] A. Completo, A. Festas, and J. P. Davim, *Tecnologia de fabrico*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2009.
- [53] “ISO 6892-1:2009. Metallic materials - Tensile testing, - Part 1: Method of test at room temperature.”.
- [54] S. CORPORATION, *SHIMADZU MICRO HARDNESS TESTER HMV-2000 INTRUCTION MANUAL*. 1995.
- [55] “Hardness Testing Part 1.” [Internet]. Disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/>.
- [56] “Indentation Software User ’ s manual,” vol. 0, no. December 08.
- [57] “Resources: Properties - Microstructures of Copper and Copper Alloys.” [Internet]. Disponível em: <http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/>. [Acedido em: 05-Maio-2016].
- [58] M. Martins, L. C. Casteletti, L. F. Bonavina, and L. R. N. Forti, “Análise microestrutural de aços inoxidáveis altamente ligados: da amostragem à interpretação,” *IX Semin. Bras. do Aço Inox. - Inox 2008*, 2008.
- [59] “Preparação de Amostras para Analise Microestrutural-1 - microestruturas e...” [Internet]. Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAfoDYAB/preparacao-amstras-analise-microestrutural-1>. [Acedido em: 05-Maio-2016].
- [60] “Thermal Conductivity of some common Materials and Gases.” [Internet]. Disponível em: [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html). [Acedido em: 06-Junho-2016].
- [61] M. . Xia, E. Biro, Z. L. Tian, and Y. N. Zhou, “Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels,” *ISIJ Int.*, vol. 48, 2008.
- [62] M. D. Taylor, K. S. Choi, X. Sun, D. K. Matlock, C. E. Packard, L. Xu, and F. Barlat, “Correlations between nanoindentation hardness and macroscopic mechanical properties in DP980 steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 597, 2014.



- [63] V. H. Baltazar Hernandez, S. K. Panda, M. L. Kuntz, and Y. Zhou, “Nanoindentation and microstructure analysis of resistance spot welded dual phase steel,” *Mater. Lett.*, vol. 64, 2010.
- [64] J. Liao, J. A. Sousa, A. B. Lopes, X. Xue, F. Barlat, and A. B. Pereira, “Mechanical, microstructural behaviour and modelling of dual phase steels under complex deformation paths,” *Int. J. Plast.*, 2016.
- [65] P. Švec, A. Schrek, V. Hrnčiar, and T. Csicsó, “Fibre laser welding of dual phase steels,” *Acta Metall. Slovaca*, vol. 21, 2015.
- [66] F. Kong, S. Santhanakrishnan, D. Lin, and R. Kovacevic, “Modeling of temperature field and grain growth of a dual phase steel DP980 in direct diode laser heat treatment,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, 2009.

## **Anexos**



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		Trabalho de Mestrado		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
	NAME	DATE		TITLE:  Dispositivo de fixação				
	José Pedro Amorim	15.02.2016						
	Prof. António Bastos	15.02.2016						
		MATERIAL:		Qt.  1				A3
		Alumínio 6082-T6						
		WEIGHT:		SCALE:1:2				SHEET 1 OF 1



	4	3	2	1		
F					F	
E					E	
D					D	
C					C	
B					B	
A					A	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		Trabalho de Mestrado		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME		SIGNATURE		DATE	TITLE:	
DRAWN José Amorim				24.02.2016	Adaptação para gás (dispositivo de fixação)	
CHK'D						
APPV'D Prof. António Bastos				24.02.2016		
MFG						
Q.A				MATERIAL:	Qt.	A4
				peça existente	1	
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1
	4	3	2	1		

Fazer os 2 furos roscados

